Richard P. Feynman

laureat al Premiului Nobel

fun, de'mental

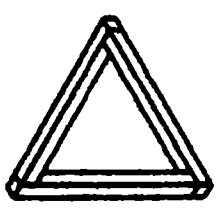
DESPRE CARACTERUL LEGILOR FIZICII

PERG MENT

Richard P. Feynman

DESPRE CARACTERUL LEGILOR FIZICII

traducere de Valentin Stoica



Bucuresti, 2006

Coperta şi tehnoredactarea: Valentin Stoica
Ilustrația copertei: M. C. Escher, *Liberation*, 1955; litografie, 43,5 x 20 cm.
Redactor: Ioana Stoica

Richard P. Feynman, *The Character of Physical Law*
© 2006 Richard P. Feynman

M.C. Escher's "Liberation" © 2005 The M.C. Escher Company-Holland.
All rights reserved. www.mcescher.com

© 2006 Editura Pergament
Toate drepturile prezentei ediții aparțin Editurii Pergament.
Reproducerea în parte ori în întregime, de orice natură, vânzarea şi/sau distribuția, se pot face numai cu acordul scris al editurii.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
FEYNMAN, RICHARD P.
Despre caracterul legilor fizicii / Richard P. Feynman ; pref.: Paul Davies. - Bucureşti : Pergament, 2006
ISBN (10) 973-85481-1-X ; ISBN (13) 978-973-85481-1-4

I. Davies, Paul (pref.)

53

S. C. PERGAMENT S. R. L.
Înregistrată la Registrul Comerțului cu numărul J40/5359/30.05.2001
Sediul: Bucureşti, sector 1,
b-dul Ion Mihalache, nr. 337,
bl. 14, sc. A, et. 2, ap. 12
Telefon: (004) 021 665 6050

CUPRINS

1.	Legea atracției universale, un exemplu de lege a fizicii	9
2.	Relația dintre matematică şi fizică	33
3.	Marile principii de conservare	55
4.	Simetria în legile fizicii	77
5.	Distincția între trecut şi viitor	97
6.	Probabilitate şi incertitudine: perspectiva mecanicii cuantice asupra naturii	113
7.	Căutând noi legi	131

1 LEGEA ATRACȚIEI UNIVERSALE, UN EXEMPLU DE LEGE A FIZICII

Este ciudat, dar în rarele ocazii când eram invitat undeva în mod oficial să cânt la bongo-uri, cel care mă prezenta nu găsea de cuviinţă să menţioneze că eu mă ocup şi cu fizica teoretică. Probabil din cauza faptului că acordăm mai mult respect artelor decât ştiinţelor. Artiştii renascentişti spuneau că principala preocupare a omului ar trebui să fie omul; totuşi, pe lume există şi alte lucruri de interes. Chiar şi artiştii apreciază apusurile de soare, şi talazurile oceanului, şi defilarea stelelor pe bolta cerească. Există deci motive pentru care să discutăm uneori şi despre alte lucruri. Atunci când privim aceste lucruri, resimţim o plăcere estetică la simpla lor observare. Dar în cadrul fenomenelor naturii există şi ritmuri şi tipare ce nu se văd cu ochiul liber, ci doar cu ochiul minţii; şi tocmai pe aceste tipare le numim noi legi ale fizicii. Ceea ce doresc să discut în acestă serie de prelegeri sunt caracteristicile generale ale acestor legi ale fizicii; dacă vreţi, este vorba despre un nivel mai presus de legile însele, de o mai mare generalitate. Propriu-zis, ceea ce iau în discuţie este natura aşa cum este ea văzută ca urmare a analizării ei minuţioase, însă doresc să vorbesc în principal doar despre cele mai cuprinzătoare calităţi generale ale naturii.

Acuma, un asemenea subiect are tendinţa de a deveni prea filosofic, din cauză că ajunge prea general, iar vorbitorul se exprimă în termeni atât de generali din dorinţa de a se face înţeles de toată lumea. Ca urmare, discuţia apucă a fi considerată drept cine ştie ce filosofie adâncă. Eu aş dori să fiu ceva mai deosebit: să fiu înţeles într-o manieră directă, nu vagă. Aşa încât, în această prelegere am să încerc să ofer, în loc doar de generalităţi, un exemplu concret de lege a fizicii, astfel încât să aveţi la dispoziţie măcar unul din lucrurile despre care voi vorbi generalităţi. Astfel, veţi putea folosi acest exemplu de fiecare dată, pentru a particulariza şi a da consistenţă unor

considerente altminteri prea abstracte. Ca exemplu aparte am ales legea din cadrul teoriei gravitației, referitoare la atracția universală. De ce am ales-o pe aceasta, nu știu. Efectiv, este una din primele legi descoperite în fizică, și are o istorie interesantă. Veți spune: „Bine, dar asta este fumată demult; vrem să auzim câte ceva despre știința mai modernă." Poate mai recentă, dar nu mai modernă. Știința modernă este exact în tradiția descoperirii Legii Atracției Universale. Ar însemna doar să vă spun de descoperiri mai recente. Nu mă deranjează câtuși de puțin să vă vorbesc despre Legea Atracției Universale, pentru că descrierea istoriei și metodelor ei, a caracterului descoperirii ei, a calităților ei, se constituie în ceva absolut modern.

Această lege a fost numită „cea mai mare generalizare la care a putut accede mintea omului" și, din prezentarea mea, probabil că deja bănuiți că ceea ce mă interesează este nu atât mintea omului, cât minunăția unei naturi care poate asculta de o lege atât de elegantă și de simplă precum Legea Atracției Universale. Ca atare, accentul va cădea nu pe cât de isteți suntem noi că am descoperit-o, ci pe cât de isteață este natura că îi dă ascultare.

Legea Atracției Universale spune că două corpuri exercită unul asupra celuilalt o forță care variază invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele și direct proporțional cu produsul maselor lor. Matematic, putem scrie această importantă lege sub forma

$$F = G \frac{m m'}{r^2}$$

adică, o anumită constantă înmulțită cu produsul maselor și împărțită la pătratul distanței. Acuma, dacă mai adaug remarca potrivit căreia, la exercitarea unei forțe asupra lor, corpurile reacționează accelerând, sau, mai precis, modificându-și în fiecare secundă viteza cu o cantitate invers proporțională cu masa lor, înseamnă că am spus tot ce era de spus în legătură cu Legea Atracției Universale. Orice altceva nu constituie decât o consecință matematică a acestor două lucruri. Acuma, eu știu că nu toți dintre dumneavoastră sunteți matematicieni, și că nu puteți sesiza imediat toate consecințele acestor două remarci. Așa încât, ceea ce aș dori să fac în continuare este să vă spun pe scurt istoria acestei descoperiri, care sunt câteva din consecințele ei, ce efect a avut ea asupra istoriei științei, ce fel de mistere ascunde o asemenea lege, câte ceva despre rafinările aduse ei de Einstein și, eventual, relația ei cu celelalte legi ale fizicii.

Pe scurt, istoria acestei chestiuni este următoarea. La început, anticii au observat modul în care planetele păreau să se mişte pe cer şi au concluzionat că ele toate, inclusiv Pământul, se rotesc în jurul Soarelui. Mai târziu, această descoperire a fost făcută în mod independent de către Copernic, după ce lumea uitase că ea mai fusese făcută o dată. Întrebarea care se punea acum spre studiu era: cum anume exact se rotesc ele în jurul Soarelui; adică, ce fel anume de mişcare prezintă? Au oare tot timpul Soarele drept centru al unui cerc, sau urmează ele vreun alt fel de traiectorie curbă? Şi alte asemenea lucruri. Descoperirea acestor lucruri a durat mult timp. Vremurile de după Copernic erau vremuri în care se purtau ample dezbateri pe tema dacă planetele şi Pământul chiar se rotesc în jurul Soarelui, ori dacă Pământul este centrul Universului, şi altele de genul acesta. Apoi, un bărbat pe nume Tycho Brahe* a avansat o metodă de a răspunde la întrebări. El s-a gândit că poate ar fi o idee bună să se urmărească cu foarte multă atenție şi să se înregistreze cu exactitate punctele în care planetele se vedeau pe cer, iar pe baza acestora să se încerce diferențierea teoriilor alternative. Aceasta reprezintă cheia ştiinței moderne şi constituie începutul adevăratei înțelegeri a naturii; această idee de a te uita la un lucru, de a înregistra detaliile şi de a spera că informațiile astfel obținute ar putea conține indicii cu privire la vreuna sau alta din interpretările teoretice. Aşa că Tycho, om bogat care deținea o insulă lângă Copenhaga, şi-a garnisit insula cu mari sextanți şi alidade de alamă şi cu puncte speciale de observație, şi a înregistrat noapte de noapte poziția planetelor. Numai printr-o astfel de muncă asiduă putem descoperi ceva.

Atunci când toate acele date au fost adunate, ele au încăput pe mâna lui Kepler,** care a încercat apoi să analizeze ce fel de mişcare au planetele în jurul Soarelui. El a făcut acest lucru prin încercări succesive. La un moment dat, a crezut că le-a dat de cap: se părea că planetele se rotesc în jurul Soarelui pe traiectorii circulare, cu Soarele în centru. Apoi, a observat că una din planete, parcă Marte, nu concorda prin opt minute de arc, şi a decis că eroarea era prea mare ca să îi aparțină lui Tycho Brache, şi că deci nu acesta era răspunsul. Astfel, datorită preciziei experimentului, Kepler a fost în stare să procedeze la o nouă încercare şi, în cele din urmă, a descoperit trei lucruri.

În primul rând, a descoperit că planetele se rotesc în jurul Soarelui pe traiectorii eliptice, cu Soarele într-unul din focare. Elipsa este o curbă pe care o ştiu toți artiştii, căci reprezintă pata alungită lăsată pe scenă de lumina

---

* Tycho Brahe, 1546-1601, astronom danez.

** Johann Kepler, 1571-1630, astronom şi matematician german, asistent al lui Brahe.

circulară a reflectoarelor. Copiii o cunosc şi ei, pentru că cineva le-a zis că dacă treci o bucată de sfoară printr-un inel, fixezi capetele sforii şi montezi un creion în inel, atunci el va trasa o elipsă (fig.1). Cele două puncte A şi B reprezintă focarele. Orbita unei planete în jurul Soarelui este o elipsă cu Soarele în unul din focare.

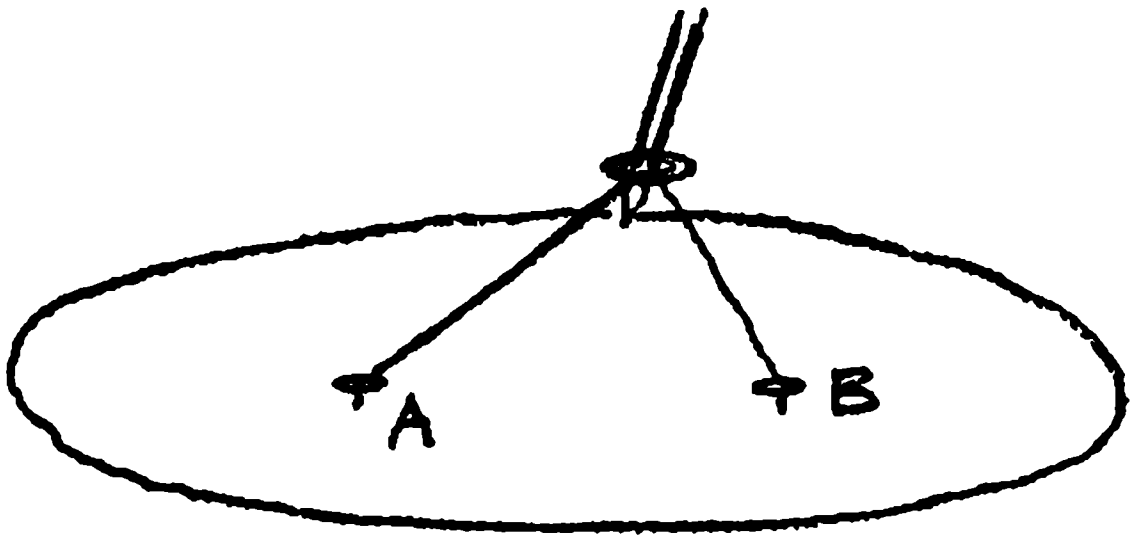


Figura 1

Următoarea întrebare era: în ce mod parcurge planeta traiectoria eliptică? Se mişcă ea oare mai repede atunci când este mai aproape de Soare? Se mişcă oare mai încet atunci când este mai departe de Soare? Kepler a găsit răspunsul şi la această chestiune (fig.2). El a descoperit că, dacă se trasează poziţiile unei planete la două momente de timp între care există un interval bine stabilit – să zicem, trei săptămâni – şi apoi alte două poziţii ale planetei, într-un alt loc de pe orbită, separate de un interval de timp tot de trei săptă-mâni, şi dacă se trasează segmentele corespunzătoare care unesc Soarele cu planeta (numite în mod tehnic raze vectoare), atunci aria delimitată de orbită şi de cele două linii corespunzătoare poziţiilor succesive ale planetei la un interval de timp de trei săptămâni, are aceeaşi valoare în orice porţiune a elipsei. Aşa încât, trebuie că planeta se mişcă mai repede atunci când este mai aproape de Soare şi mai încet atunci când este mai departe de Soare.

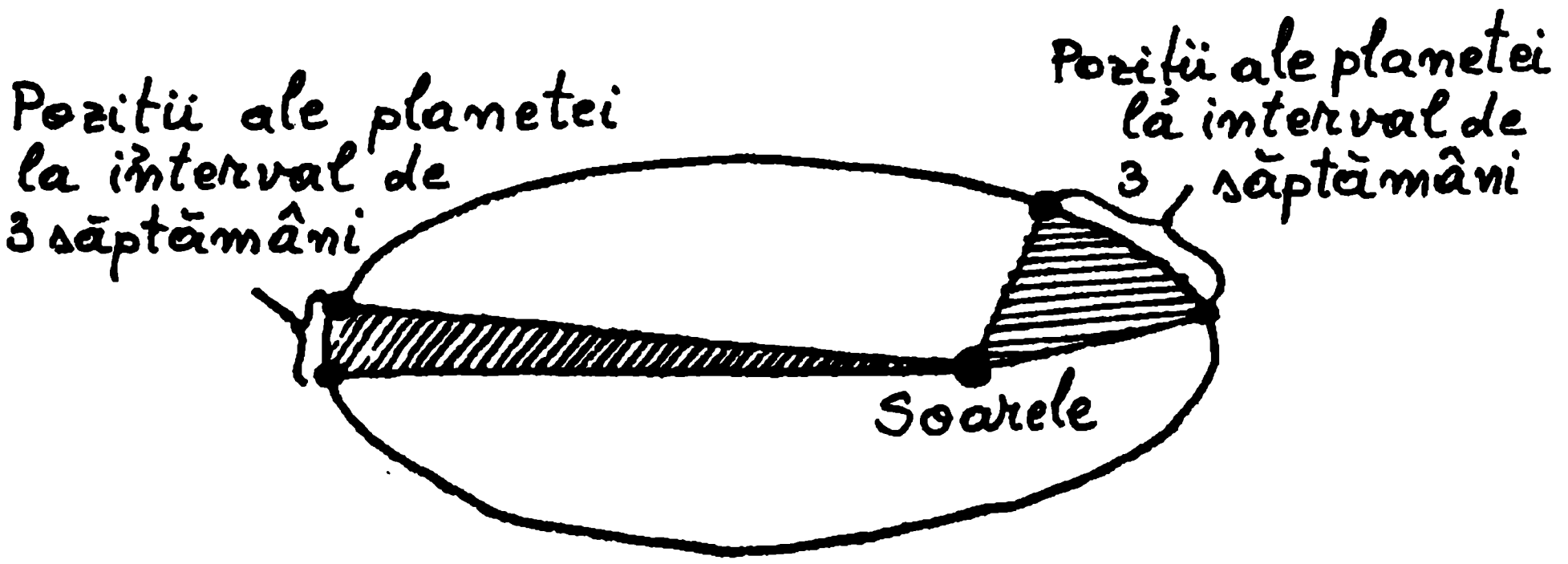


Figura 2

Câțiva ani mai târziu Kepler a descoperit şi o a treia regulă, care nu se referă doar la mişcarea unei planete în jurul Soarelui, ci corelează între ele mişcările tuturor planetelor. Ea afirmă că timpul necesar planetei pentru a efectua o rotație completă în jurul Soarelui este legat de dimensiunea orbitei, el variind cu rădăcina pătrată a cubului diametrului mare al elipsei. Aşadar, Kepler dispunea de aceste trei legi care, în rezumat, ne spun că *orbitele sunt elipse*, *în intervale de timp egale se mătură arii egale* şi *perioada de revoluție variază cu axa mare a elipsei la puterea unu şi jumătate*. Aceste trei legi ale lui Kepler oferă o descriere completă a mişcării planetelor în jurul Soarelui.

Următoarea întrebare a fost: ce oare face ca aceste planete să se rotească în jurul Soarelui? Pe vremea lui Kepler, unii oameni au răspuns că existau îngeri în spatele planetelor care băteau din aripi şi le împingeau pe orbite. Aşa cum veți vedea, răspunsul nu este departe de adevăr. Singura diferență este aceea că îngerii sunt dispuşi în altă poziție şi împing bătând din aripi înspre interiorul curbei.

Între timp, Galilei cerceta legile mişcării obiectelor obişnuite, aflate la îndemână pe Pământ. Studiind aceste legi şi efectuând o serie de experimente privitoare la rostogolirea bilelor pe plane înclinate, la oscilațiile pendulelor şi altele, el a descoperit un principiu important, numit Principiul Inerţiei. Acesta afirmă: dacă asupra unui obiect care se deplasează cu o anumită viteză în linie dreaptă nu acționează nimic, atunci obiectul se va deplasa mereu cu exact aceeaşi viteză în exact aceeaşi direcție. Oricât de incredibil ar părea acest lucru cuiva care a încercat să facă să se rostogolească la nesfârşit o bilă, dacă această idealizare este corectă şi asupra bilei nu se exercită nici o influență precum, de pildă, frecarea cu podeaua, atunci bila se mişcă tot timpul cu viteză constantă.

Următorul pas a fost făcut de Newton, care a abordat chestiunea: „Dar în cazul în care corpul nu se mişcă rectiliniu uniform, *atunci* cum stă treaba?“ El a răspuns astfel: pentru a schimba de orice manieră viteza, este nevoie de o forță. De exemplu, dacă împingi o bilă în direcția în care ea se mişcă, viteza ei creşte. Dacă observi că viteza îşi schimbă direcția, atunci trebuie că forța a fost laterală. Forța poate fi măsurată prin intermediul produsului a două efecte. Cât de mult se modifică viteza într-un scurt interval de timp? Lucrul acesta poartă numele de accelerație, iar dacă se înmulțeşte accelerația cu un coeficient numit masa corpului, sau coeficient de inerție,

rezultatul reprezintă forţa. Treaba aceasta se poate măsura. De exemplu, dacă se leagă o piatră la capătul unui fir şi se roteşte deasupra capului, se constată că trebuie tras de fir, deoarece, chiar dacă valoarea vitezei nu se modifică în cadrul unei mişcări circulare, se schimbă totuşi direcţia ei: trebuie să existe tot timpul o forţă care împinge înspre interior, iar aceasta este proporţională cu masa. Astfel, dacă ar fi să luăm două obiecte şi să le rotim pe rând deasupra capului cu aceeaşi viteză, şi dacă am măsura forţele necesare, forţa la cel de-al doilea corp ar fi mai mare decât la primul în aceeaşi proporţie în care masa lui ar diferi de a primului. Acesta constituie un mod de a măsura masele, determinând forţele necesare pentru a le modifica vitezele. Newton a dedus de aici că, spre exemplu, în cazul simplu al mişcării unei planete pe o traiectorie circulară în jurul Soarelui, *nu este nevoie de nici o forţă pentru a face planeta să se deplaseze lateral, tangenţial*. Însă, dacă n-ar exista forţă deloc, planeta ar ţine-o tot drept, înainte. Dar, de fapt, ea nu merge drept: ulterior, ea se găseşte nu acolo unde ar trebui să fie dacă nu ar exista nici o forţă, ci ceva mai spre Soare (fig.3). Cu alte cuvinte, mişcarea ei, viteza ei, au fost deviate către Soare. Deci, ceea ce trebuie să facă îngerii este să bată tot timpul din aripi înspre Soare.

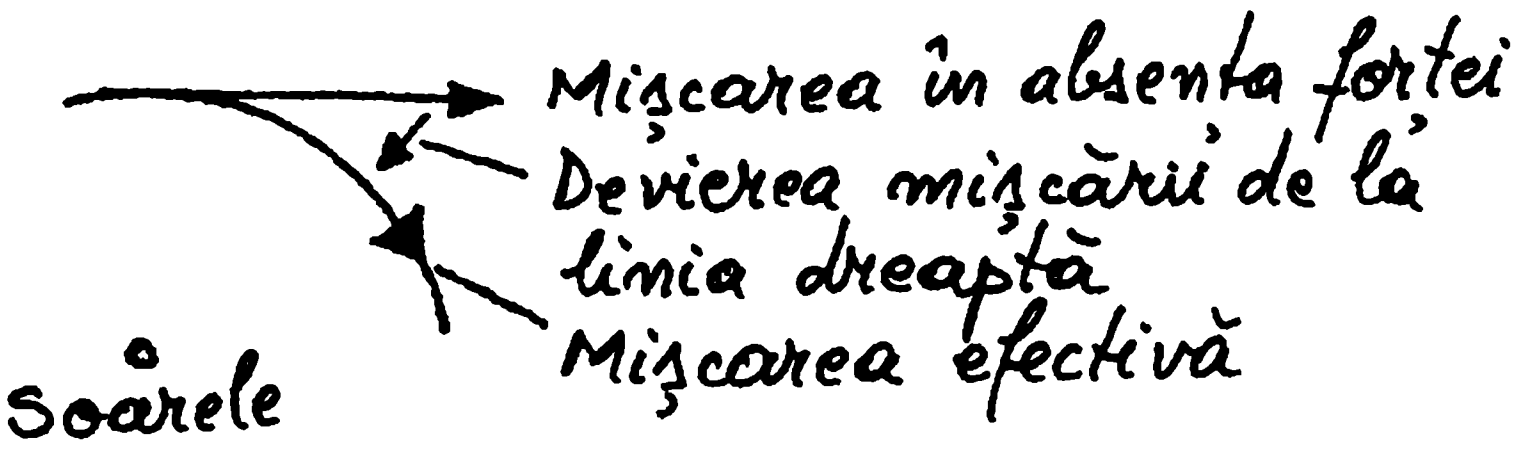


Figura 3

În schimb, mişcarea care ar menţine planeta într-o deplasare rectilinie uniformă nu are nici o cauză cunoscută. Motivul pentru care obiectele o ţin drept înainte la nesfârşit nu a fost niciodată descoperit. Principiul Inerţiei nu are nici o cauză cunoscută. Deşi îngerii nu există, mişcarea se continuă, pe când, pentru a obţine o cădere, avem nevoie de o forţă. Devenise evident că sursa forţei sălăşluia în Soare.

În aceeaşi ordine de idei, Newton a putut demonstra faptul că afirmaţia potrivit căreia, în intervale de timp egale se mătură arii egale, este o consecinţă directă a ideii simple că toate schimbările de viteză sunt orientate exact spre Soare, chiar şi în cazul mişcării pe elipsă. În următoarea prelegere voi fi în măsură să vă arăt în detaliu cum se face aceasta.

Bazându-se pe legea menţionată, Newton a putut confirma ideea potrivit căreia forţa este orientată spre Soare. Iar pornind de la cunoaşterea modului în care perioadele de revoluţie ale diferitelor planete variază cu distanţa până la Soare, se poate determina cum trebuie să slăbească forţa cu creşterea distanţei. El a fost în stare să demonstreze că forţa trebuie să varieze invers proporţional cu pătratul distanţei.

Până aici, Newton nu spusese nimic nou, căci nu făcuse decât să afirme două lucruri pe care Kepler le enunţase într-un alt limbaj. Unul era absolut echivalent cu afirmaţia că forţa este orientată înspre Soare, iar celălalt era absolut echivalent cu enunţul că forţa variază invers proporţional cu pătratul distanţei.

Însă lumea văzuse prin telescoape sateliţii planetei Jupiter rotindu-se în jurul acesteia şi arătând ca un mic sistem solar, ca şi când ei ar fi fost atraşi de planetă. Luna este atrasă de Pământ şi se roteşte în jurul Pământului, iar atracţia este de aceeaşi natură. Pare că orice este atras de orice altceva şi, în consecinţă, următorul pas a fost să se generalizeze afirmaţia şi să se spună că orice obiect atrage orice alt obiect. Dacă aşa stau lucrurile, atunci Pământul trebuie că atrage Luna exact la fel cum Soarele atrage Pământul. Dar faptul că Pământul atrage corpurile este ştiut, căci dumneavoastră staţi cu toţii aşezaţi sănătos pe scaune, în ciuda eventualei dorinţe de a pluti prin aer. Atragerea obiectelor de către Pământ era binecunoscută în momentul studierii fenomenului gravitaţiei, iar ideea lui Newton a fost aceea că poate gravitaţia care menţine Luna pe orbită era aceeaşi gravitaţie care atrage obiectele către Pământ.

Este uşor de estimat cât de mult cade Luna în timp de o secundă, deoarece se cunoaşte dimensiunea orbitei ei, şi se ştie că durează o lună să efectueze o rotaţie completă în jurul Pământului. Dacă se calculează ce distaţă parcurge ea într-o secundă, se poate determina cu cât a coborât orbita circulară a Lunii sub linia dreaptă pe care ar fi urmat-o altminteri. Această distanţă reprezintă a douăzecea parte dintr-un inci.* Luna se află de şaizeci de ori mai departe de centrul Pământului decât ne aflăm noi: noi ne găsim la 4000 de mile de centru, iar Luna se află la 240.000 de mile; deci, dacă legea era corectă, un corp situat la suprafaţa Pământului trebuia să cadă în timp de o secundă pe o distanţă de 1/20 × 3600 (pătratul lui 60) inci, pentru că,

---

* 1,27 mm (n.t.)

scăzând cu pătratul distanţei, forţa în dreptul Lunii era de 60 × 60 ori mai mică. 1/20 inci × 3600 înseamnă aproximativ 16 picioare;* or, se ştia deja, din măsurătorile efectuate de Galilei, că obiectele lăsate să cadă liber la suprafaţa Pământului, parcurg în prima secundă 16 picioare. Aşadar, aceasta însemna că Newton se afla pe drumul cel bun; de acum nu mai exista cale de întoarcere, întrucât un fapt nou, anterior complet independent, perioada de revoluţie a Lunii şi distaţa ei faţă de Pământ, fusese corelat cu un alt fapt, distanţa parcursă în prima secundă de cădere liberă la suprafaţa Pământului. Acest lucru constituia o spectaculoasă testare a faptului că totul era în regulă.

Mai mult, Newton a făcut o mulţime de alte predicţii. El a fost capabil să calculeze care ar fi forma orbitei dacă legea forţei este cea a inversei proporţionalităţi cu pătratul distanţei şi, evident, a găsit că aceasta ar fi o elipsă; era chiar mai mult decât intenţionase iniţial. În plus, o serie de fenomene noi căpătau explicaţii evidente.

Unul dintre ele îl constituiau mareele. Mareele se datorează atracţiei exercitate de Lună asupra Pământului, cu apele sale. Acest lucru mai fusese gândit uneori şi înainte, cu singura dificultate că dacă atracţia exercitată de Lună asupra apei era cea care făcea ca nivelul acesteia din urmă să fie mai ridicat în partea dinspre Lună, atunci ar fi trebuit să se producă doar o maree pe zi (fig. 4), când, de fapt, noi ştim că mareele au loc aproximativ una la douăsprezece ore, adică, de două ori pe zi. Mai exista şi o altă şcoală de gândire, care ajunsese la o concluzie diferită. Teoria lor era aceea că Pământul ar fi fost atras afară din apă de către Lună. Newton a fost efectiv primul care şi-a dat seama ce se întâmpla: forţa Lunii asupra uscatului şi a apei este aceeaşi la distanţe egale; apa din

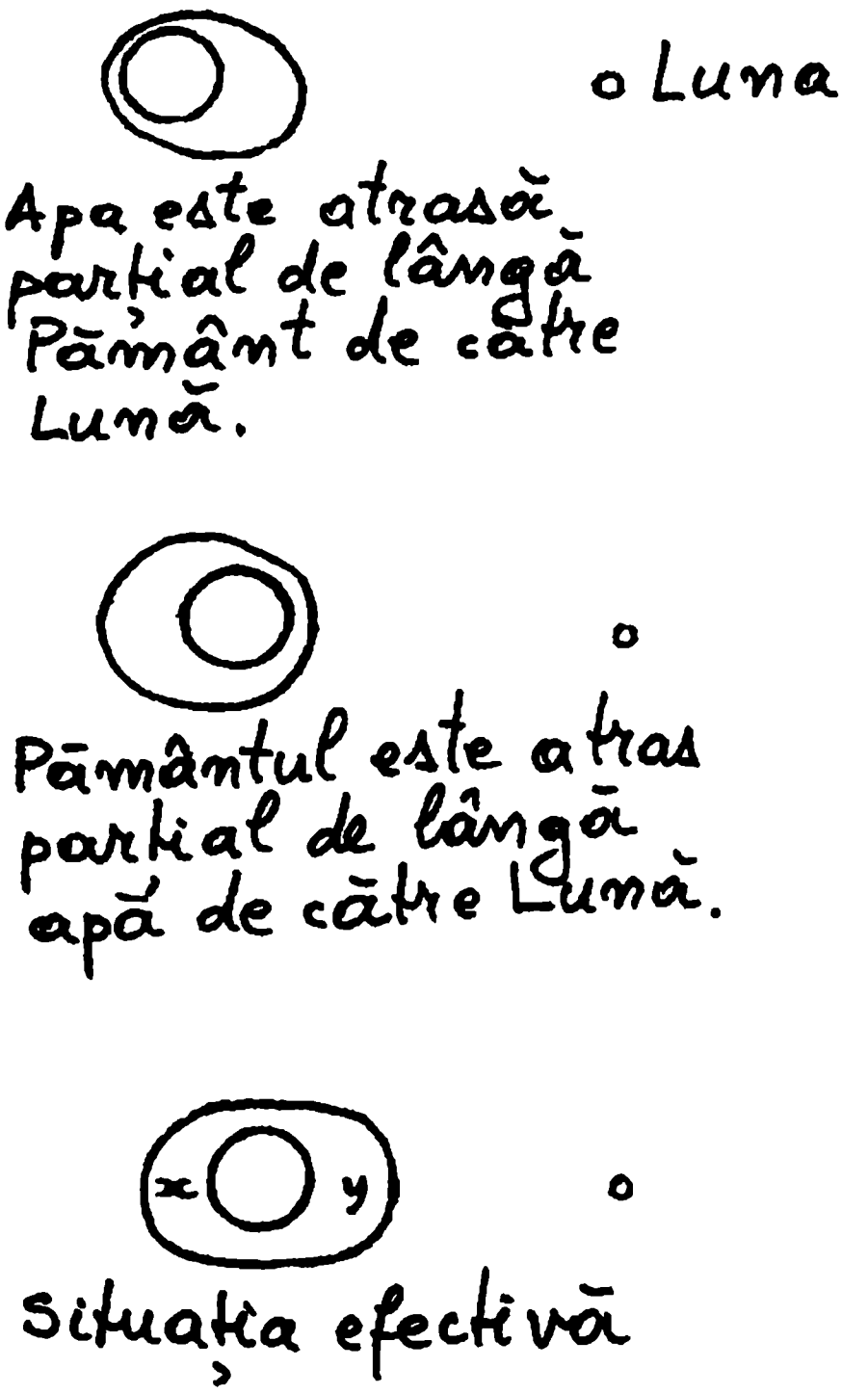


Figura 4

---

* 5m (n.t.)

punctul y este mai aproape de Lună decât Pământul rigid, iar cea din punctul x este mai departe. În y apa este atrasă mai tare spre Lună decât Pământul, iar în x este atrasă mai puțin, deci mareea dublă se explică prin combinarea celor două teorii. De fapt, Pământul execută aceeaşi acrobație ca şi Luna: se roteşte pe un cerc. Forța exercitată de Lună asupra lui este echilibrată, dar de către ce anume? Exact aşa cum Luna se mişcă pe un cerc pentru a echilibra forța din partea Pământului, tot la fel şi acesta descrie un cerc, al cărui centrul se situează undeva în interiorul Pământului şi echilibrează atracția Lunii. Cele două planete se rotesc în jurul unui centru comun, astfel încât forțele să se echilibreze, însă apa din punctul x este atrasă mai puțin iar cea din punctul y mai mult, ea ridicându-se astfel de ambele părți. Pe scurt, s-a explicat atunci şi de ce se produc mareele, şi de ce sunt câte două pe zi. O mulțime de alte lucruri au devenit limpezi: că Pământul este rotund pentru că totul este atras înspre interior; că Pământul nu este rotund pentru că se roteşte în jurul propriei axe şi zonele periferice sunt un pic împinse în afară spre a echilibra atracția; că Soarele şi Luna sunt rotunde, şi aşa mai departe.

Pe măsură ce ştiința evolua şi măsurătorile deveneau tot mai precise, testările la care era supusă legea lui Newton deveneau tot mai meticuloase, iar primele verificări amănunțite au vizat lunile lui Jupiter. Pe baza observațiilor precise privitoare la modul în care acestea se mişcă pe perioade lungi de timp, s-a putut verifica dacă totul se găsea în acord cu spusele lui Newton, şi s-a dovedit că lucrurile nu stăteau aşa. Sateliții lui Jupiter păreau uneori să o ia înainte cu opt minute, iar alteori să rămână în urmă cu opt minute în comparație cu timpul calculat din legea lui Newton. S-a observat că ei se situau în avans față de program atunci când Jupiter se găsea aproape de Pământ, şi întârziau atunci când Jupiter era departe, o situație oarecum bizară. Domnul Roemer,* având încredere în Legea Atracției Universale, a ajuns la concluzia interesantă că luminii îi ia un anumit interval de timp să parcurgă distanța de la lunile lui Jupiter la Pământ, şi că ceea ce vedem noi atunci când ne uităm la acestea este nu cum arată ele acum, ci cum arătau ele în urmă cu atâta timp cât îi trebuie luminii să ajungă la noi. Atunci când Jupiter se află mai aproape de noi lumina călătoreşte într-un timp mai scurt, iar când Jupiter este mai departe, un timp mai lung. Roemer s-a apucat să corecteze diferențele de timp în plus sau în minus existente în observațiile făcute, şi în

---

* Claus Roemer, 1644-1710, astronom danez.

felul acesta a fost în stare să determine viteza luminii. Aceasta a constituit prima demonstrație a faptului că lumina nu reprezintă ceva care se propagă instantaneu.

Am supus atenției dumneavoastră această chestiune deosebită, deoarece ea ilustrează faptul că dacă o lege este corectă, ea poate fi folosită pentru a găsi o alta. Dacă avem încredere într-o lege, atunci, dacă ceva pare că nu este în regulă, acel lucru ne poate sugera un alt fenomen. Dacă nu am fi cunoscut Legea Atracției Universale, ne-ar fi luat mult mai mult timp să găsim viteza luminii, pentru că nu am fi ştiut la ce să ne aşteptăm de la sateliții lui Jupiter. Acest proces a evoluat într-o avalanşă de descoperiri, fiecare nouă descoperire punând la dispoziție uneltele necesare pentru multe altele, iar acesta reprezintă începutul avalanşei, petrecut acum 400 de ani. La ora actuală ne aflăm în continuare în acelaşi proces neîntrerupt al unei avalanşe extrem de rapide.

S-a ivit o altă problemă: planetele n-ar trebui să se deplaseze exact pe elipse, deoarece, potrivit legii lui Newton, ele sunt atrase nu numai de Soare, ci şi unele de altele; doar un pic, dar acel pic contează şi alterează mişcarea. Pentru planetele mari cunoscute, Jupiter, Saturn şi Uranus, s-au făcut calcule cu privire la cât de diferit față de elipsele perfecte ale lui Kepler ar trebui să se deplaseze ele din cauza atracției reciproce. Confruntând rezultatele cu observațiile, s-a constatat că Jupiter şi Saturn se mişcă potrivit calculelor, pe când Uranus se comportă ciudat. Încă o situație în care legea lui Newton se găsea la ananghie, dar fiți pe pace! Doi bărbați, Adams şi Leverrier,* care au efectuat calculele în mod independent şi aproape în aceeaşi vreme, au propus existența unei planete nevăzute care influența mişcarea lui Uranus. Ei au adresat scrisori observatoarelor de care aparțineau, spunându-le: „Orientați-vă telescoapele într-acolo, şi veți vedea o planetă.“ „Ce absurd,“ a răspuns unul din observatoare, „un tip care stă cu creionul în mână în fața unei foi de hârtie, să ne spună nouă unde să ne uităm pentru a găsi o nouă planetă.“ Celălalt observator a fost mai... în fine, administrația era mai altfel, şi l-au descoperit pe Neptun!

Ceva mai recent, la începutul secolului douăzeci, a devenit evident că mişcarea planetei Mercur nu era exact aşa cum trebuie. Acest lucru a cauzat o grămadă de necazuri, şi nu a putut fi explicat până când Einstein nu a arătat că legea lui Newton este uşor aproximativă şi trebuie rafinată.

* * *

---

* John Couch Adams, 1819-1892, astronom teoretician. Urbain Leverrier, 1811-1877, astronom francez.

Întrebarea este: până unde este aplicabilă această lege? Se extinde ea oare dincolo de Sistemul Solar? Din acest considerent, în Planşa 1 vă prezint o dovadă că Legea Atracției Universale acționează la o scară mai mare decât cea a Sistemului Solar. Aveți aici o serie de trei fotografii ale unei aşa-numite stele duble. În mod fericit, în cadru apare şi o a treia stea, astfel încât puteți vedea că cele două chiar se rotesc una în jurul celeilalte, şi nu a răsucit cineva poza, lucru uşor de făcut cu imaginile în astronomie. În Figura 5 este prezentată efectiv orbita pe care se mişcă ele. Este evident faptul că cele două se atrag reciproc şi că descriu traiectorii eliptice, aşa cum este de aşteptat. Succesiunea de poziții la diferite momente de timp urmează sensul acelor de ceasornic. Veți fi încântați de acestea până în momentul în care veți observa, dacă nu cumva ați şi făcut-o deja, că centrul nu constituie unul din focarele elipsei, ci este un pic decalat. Este deci ceva în neregulă cu legea? Nu. Doar că Dumnezeu a făcut ca orbita să nu fie exact cu fața spre noi: este piezişă. Dacă desenați o elipsă şi un focar al ei şi țineți hârtia sub un unghi oarecare, ceea ce vedeți când vă uitați la ea este o proiecție, al cărei focar nu trebuie neapărat să coincidă cu cel al elipsei. De-asta arată aşa.

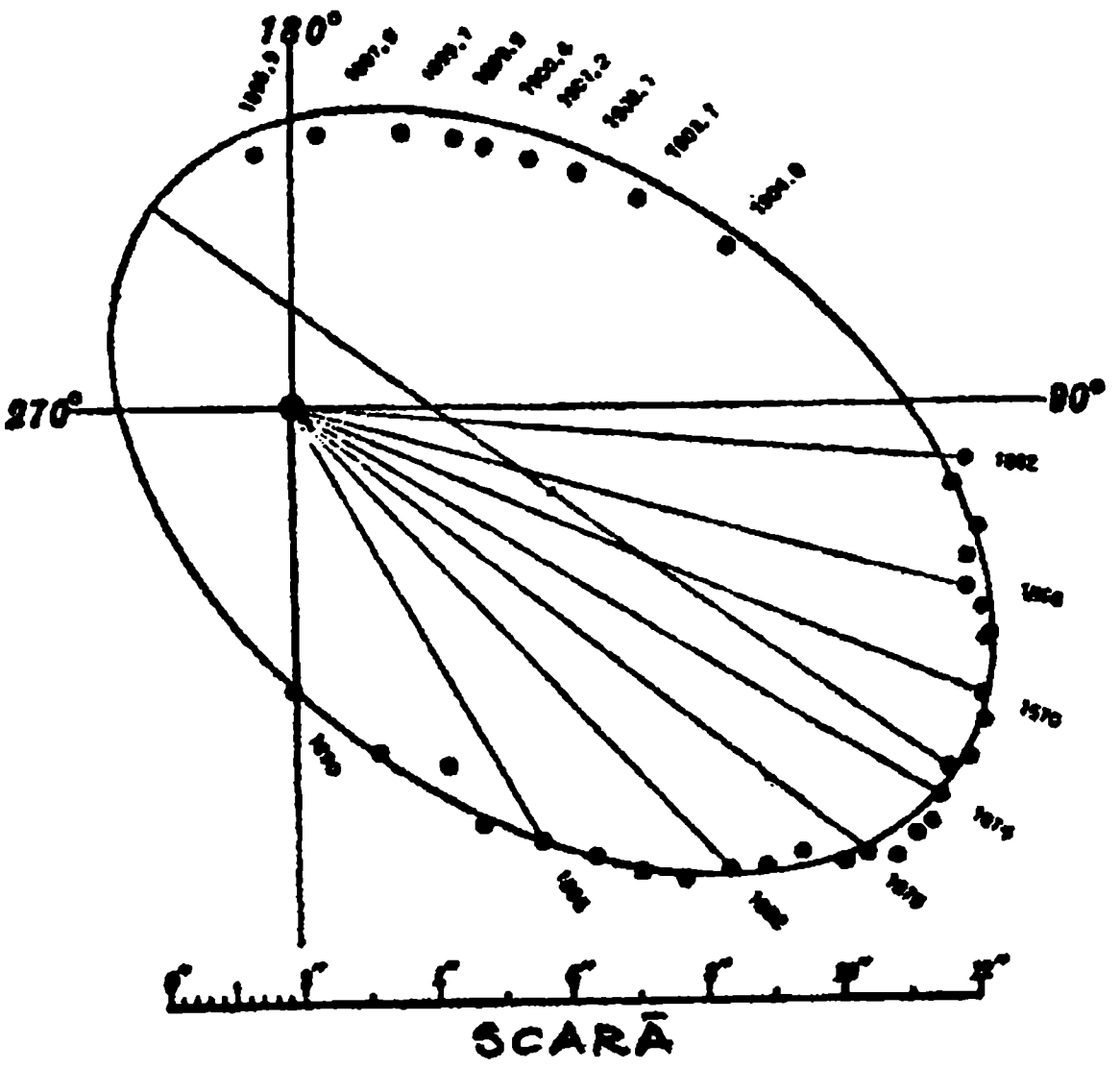
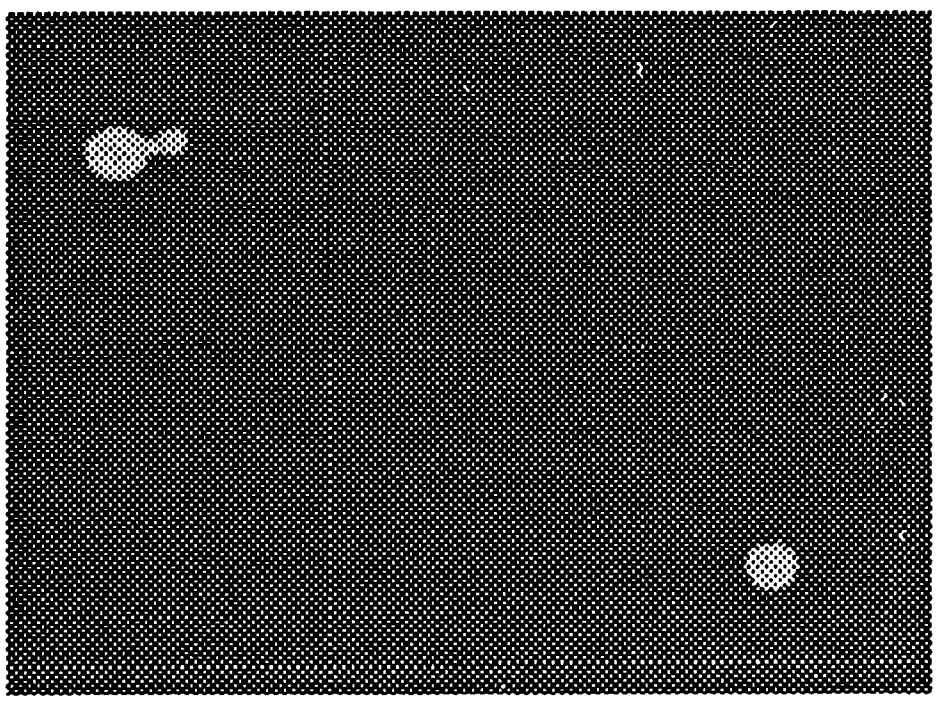
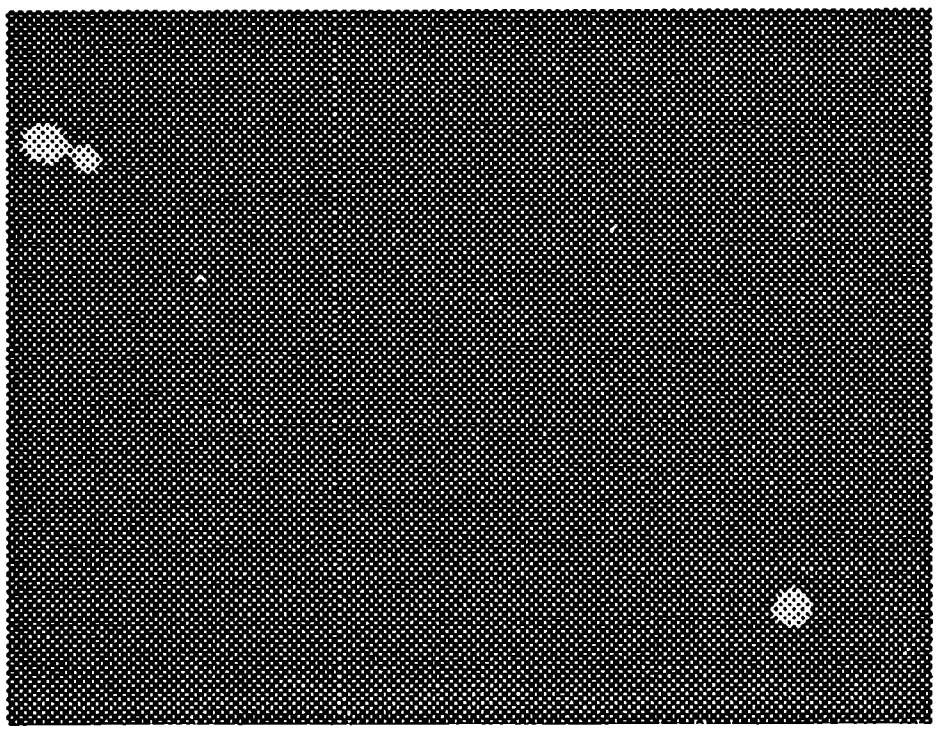


Figura 5

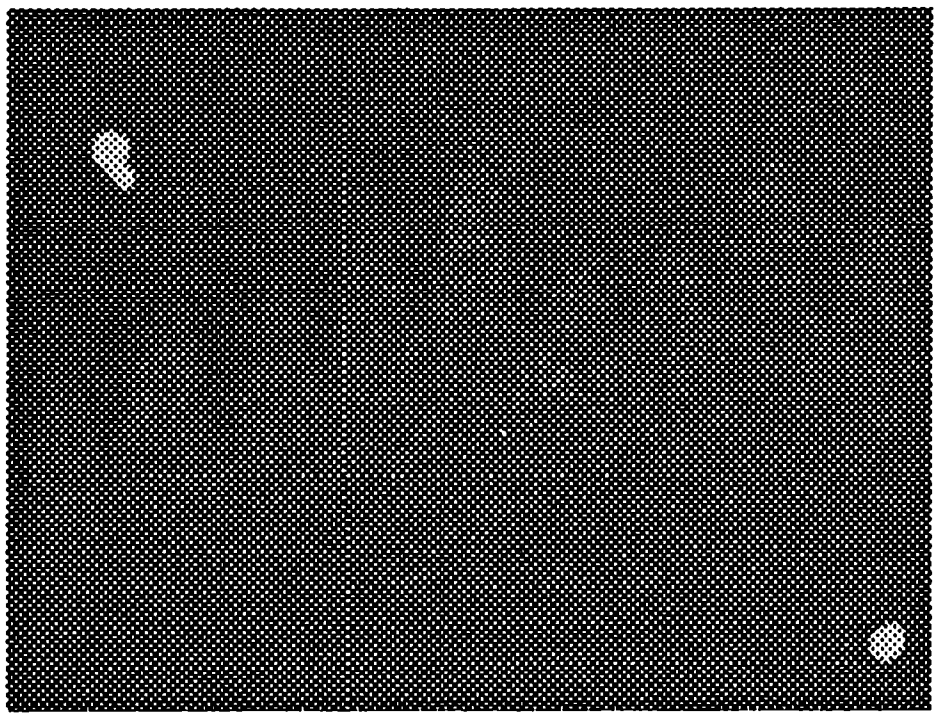
Dar cum rămâne cu distanțele încă şi mai mari? Forța de mai devreme este între două stele; acționează ea oare şi la distațe care depăşesc două-trei diametre ale Sistemului Solar? În Planşa 2 este prezentat ceva cu un diametru



21 iulie 1908

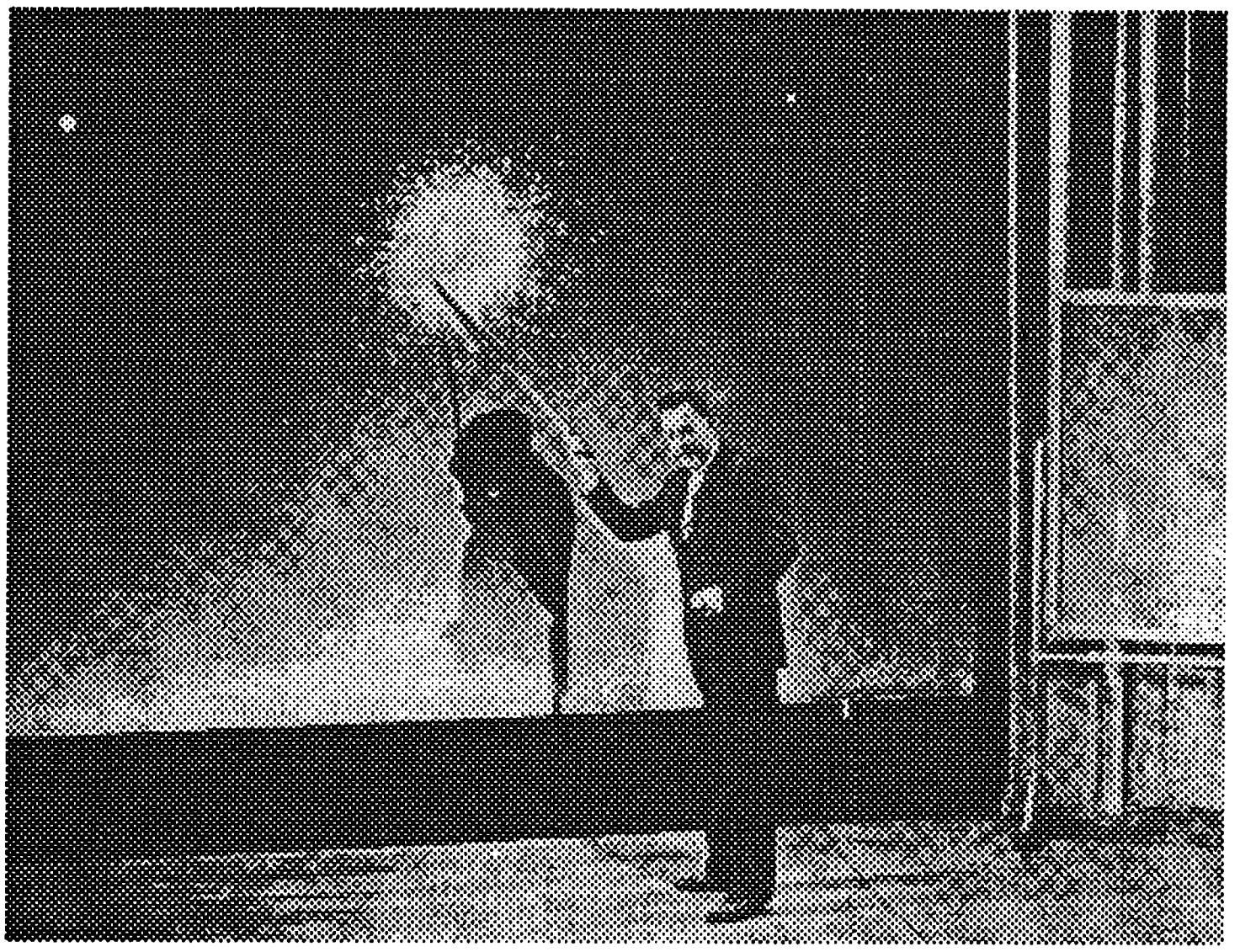


septembrie 1915

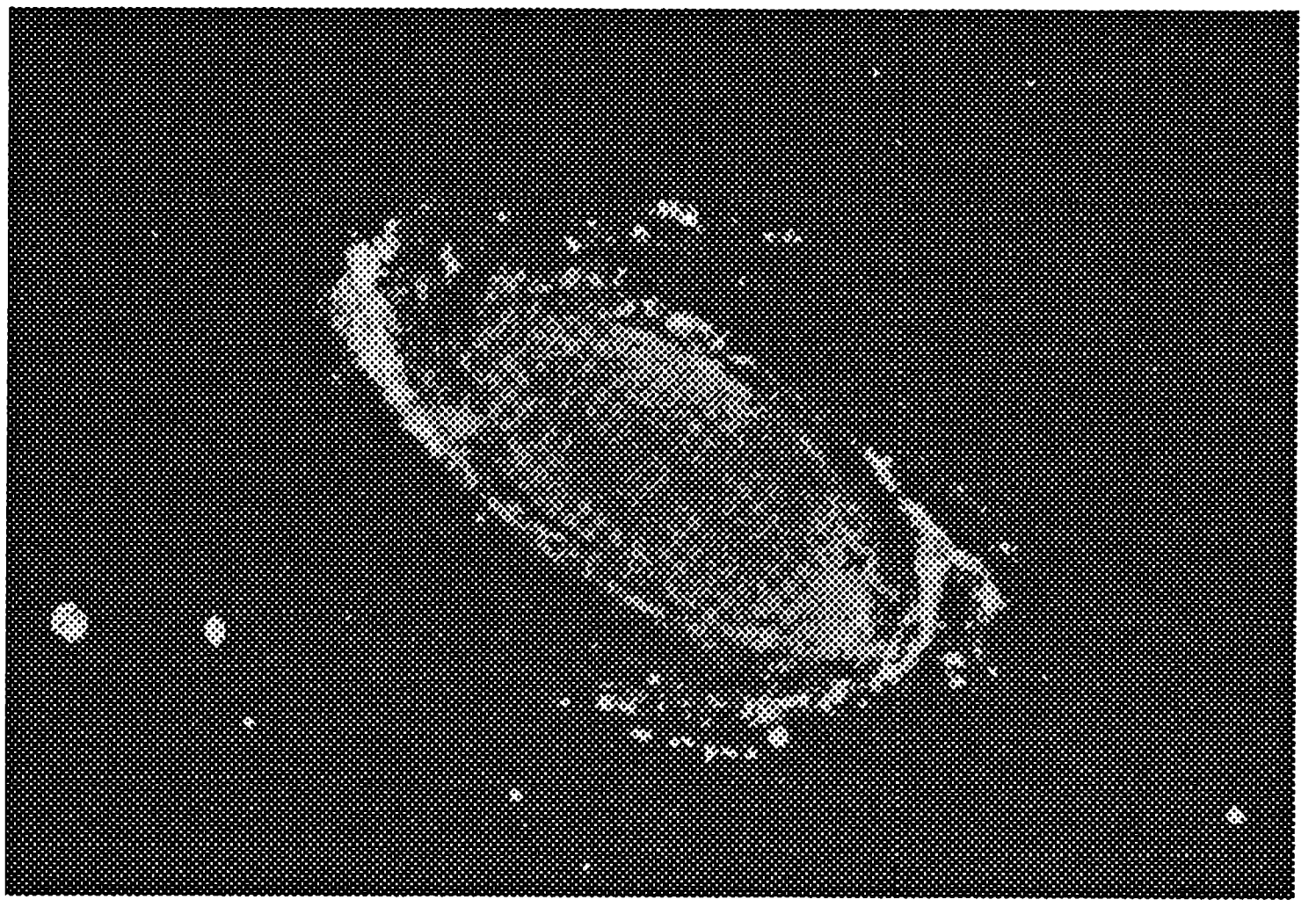


10 iulie 1920

Planşa 1



Planşa 2

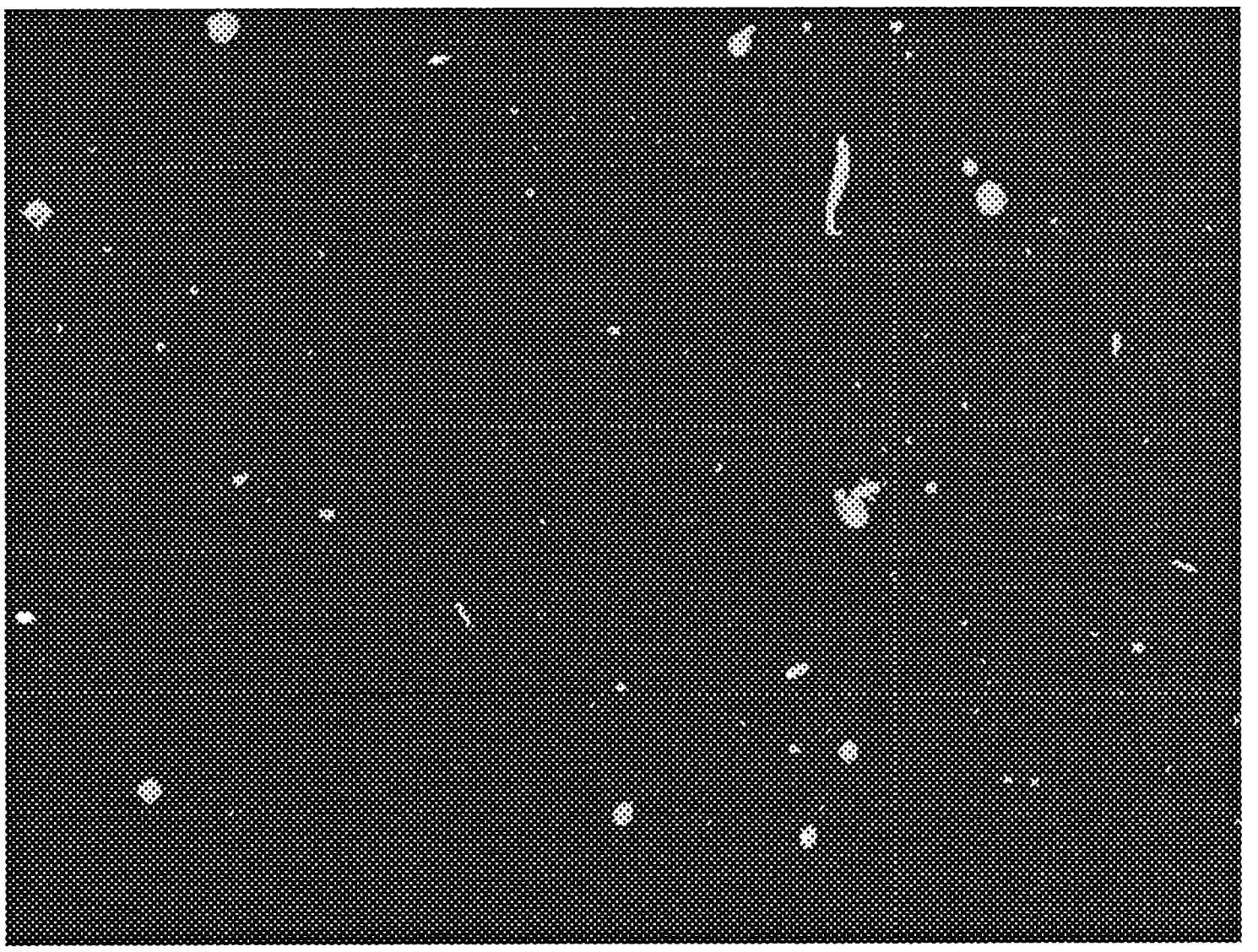


Planşa 3

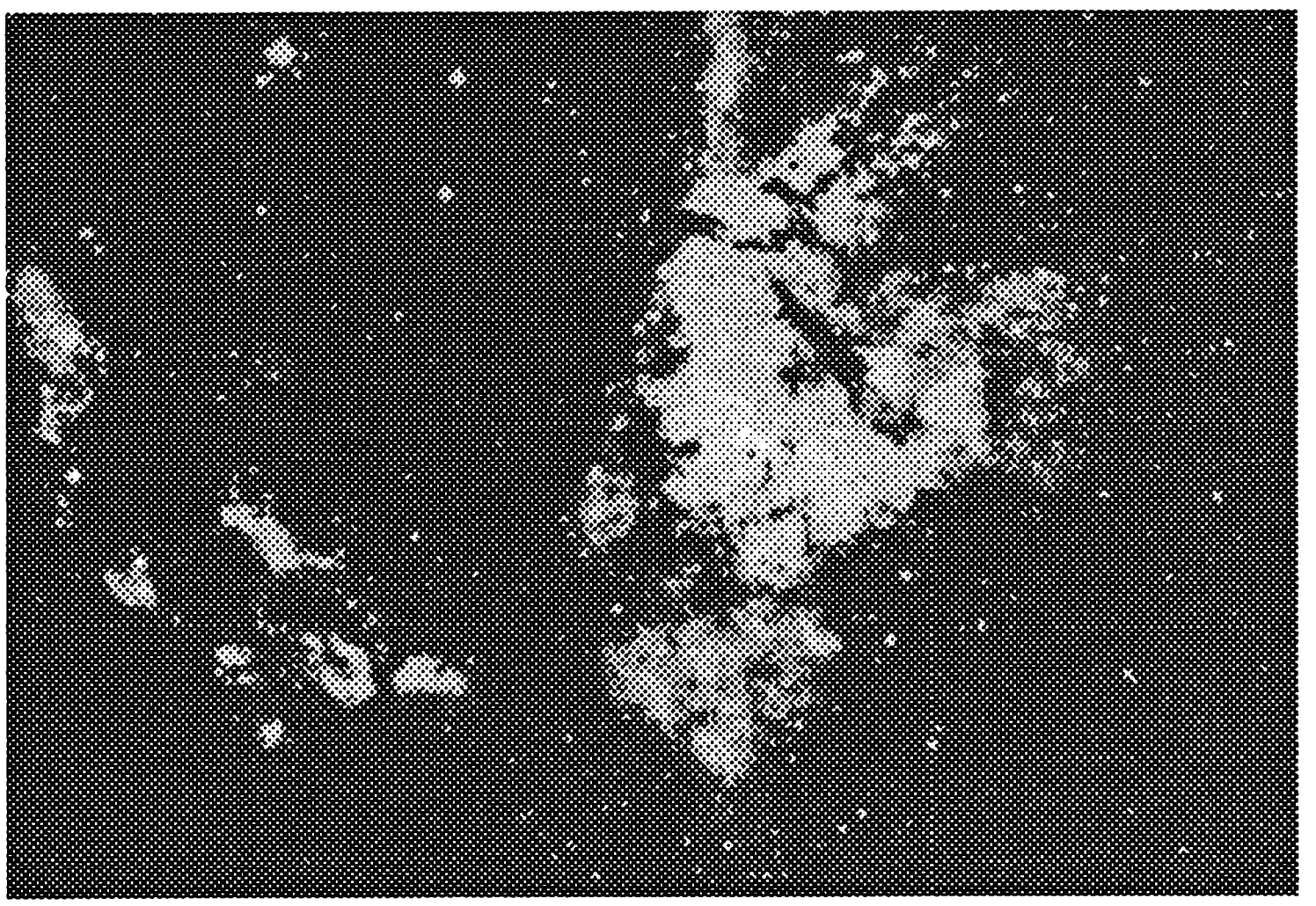
de 100.000 de ori mai mare decât al Sistemului Solar: este vorba de un număr impresionant de stele. Pata mare şi albă nu este ceva continuu; ea ne apare aşa din cauza puterii de rezoluţie insuficiente a instrumentelor. În fapt, este vorba de o mulţime de puncte foarte, foarte mici, ca şi stelele de mai înainte, bine delimitate unele de altele, mişunând în această mare aglomerare globulară. Este unul din cele mai frumoase lucruri de pe cer; este la fel de frumos precum talazurile mării şi asfinţiturile de soare. Distribuirea materiei este absolut clară. Ceea ce menţine închegată această galaxie este atracţia gravitaţională reciprocă a stelelor. Modul de repartizare a materiei şi estimarea distanţelor ne permit să găsim în mare forţa de interacţiune a stelelor... şi, evident, se adevereşte a fi în principiu invers proporţională cu pătratul distanţei. Precizia acestor măsurări şi calcule nu este nici pe departe la fel de bună ca în cazul Sistemului Solar.

Mai departe, gravitaţia se extinde şi mai mult. Acea aglomerare constituie doar un vârf de ac din galaxia reprezentată în Planşa 3. Este o galaxie tipică, şi încă o dată este limpede că obiectul acesta este menţinut în stare de agregare de către o forţă, iar singura candidată rezonabilă este gravitaţia. Atunci când ajungem la asemenea dimensiuni, nu avem cum să verificăm legea dependenţei invers proporţionale a forţei cu pătratul distanţei, dar pare să nu existe nici un dubiu că pentru aceste imense aglomerări de stele – aceste galaxii au diametre de 50.000 până la 100.000 de ani-lumină, pe când distanţa de la Pământ la Soare este de numai opt minute-lumină – gravitaţia se extinde chiar şi pe astfel de domenii. În Planşa 4 avem dovada că se extinde chiar mai mult. Aici este prezentată ceea ce numim o aglomerare de galaxii; ele sunt strânse ciorchine, asemenea unei aglomerări de stele, însă punctele luminoase pe care le vedeţi sunt chestii din acelea drăgălaşe precum cea din Planşa 3.

Dimensiunea corespunzătoare constituie în acest caz cam o zecime sau o sutime din cea a Universului, pentru care avem dovada directă a manifestării forţei gravitaţionale. Aşadar, gravitaţia Pământului se extinde la nesfârşit, chiar dacă în publicaţii s-ar putea să citiţi că cine ştie ce obiect scapă din câmpul gravitaţional al planetei. De fapt, câmpul slăbeşte tot mai mult, proporţional cu pătratul distanţei, reducându-se la un sfert de fiecare dată când distanţa se dublează, până când se pierde în oceanul câmpurilor gravitaţionale puternice ale stelelor. Împreună cu stelele din vecinătatea sa, Pământul atrage celelalte stele pentru a forma galaxia, şi cu toatele atrag alte galaxii pentru a forma un tipar, o aglomerare de galaxii. Deci câmpul



Planșa 4



Planșa 5

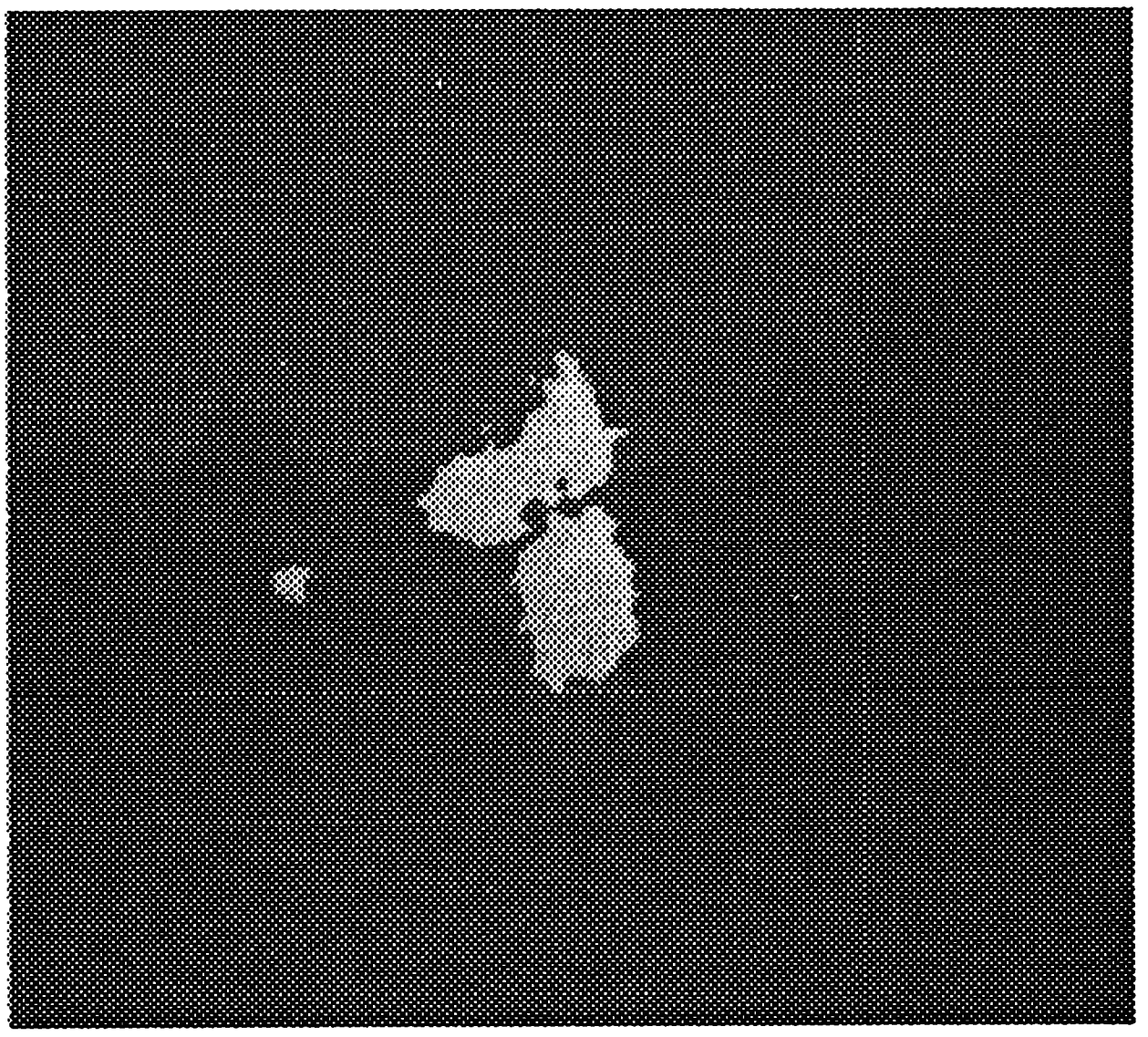
gravitaţional al Pământului nu se termină nicăieri, ci se estompează încet, potrivit unei legi riguroase şi precise, probabil până la marginea Universului.

Legea Atracției Universale este diferită de multe altele. În mod clar, ea este foarte importantă în economia, în mecanismul Universului; la scara acestuia, există multe locuri în care gravitația își găsește aplicații practice. Dar, în mod neobişnuit, prin comparație cu celelalte legi ale fizicii, Legea Atracției Universale are relativ puține aplicații practice. În această privință, am ales un exemplu atipic. (Că veni vorba: atunci când alegi ceva dintr-o mulțime, este imposibil ca acel ceva să nu fie atipic în vreun anumit sens. Aceasta este minunăția lumii.) Dacă stau să mă gândesc, singurele aplicații la scară umană care îmi vin în minte sunt în prospecțiunile geofizice, în prezicerea mareelor şi, mai nou, în determinarea traiectoriilor sateliților şi sondelor pe care le lansăm în spațiu; în fine, tot recent, în calcularea pozițiilor planetelor pentru predicțiile pe care le publică astrologii în horoscopurile din reviste. Trăim într-o lume ciudată, dacă toate noile cuceriri în cunoaştere nu fac decât să folosească la perpetuarea aiurelii ce domneşte de 2000 de ani încoace.

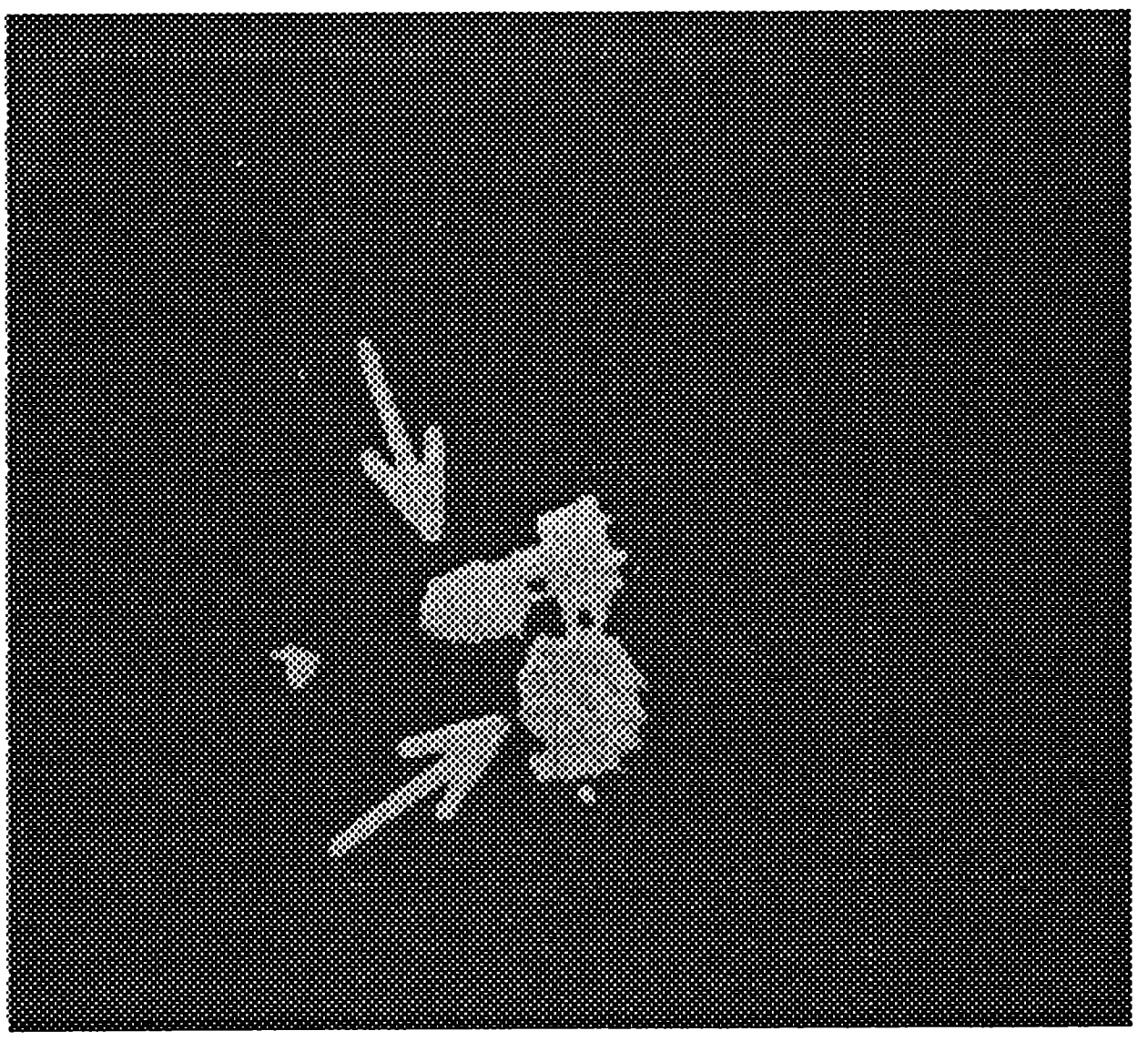
Am datoria să menționez lucrurile importante în care gravitația joacă un rol real în comportarea Universului, iar unul dintre acestea este formarea de noi stele. Planşa 5 prezintă o nebuloasă gazoasă din interiorul propriei noastre galaxii; ea nu este constituită dintr-o mulțime de stele, ci din gaz. Se poate ca apariția ei să se facă sub forma vreunei cine ştie ce unde de şoc, însă în rest fenomenul este acela de atracție gravitațională a gazului tot mai apropiat, până când gheme mari de gaz şi praf se adună sub formă de globuri; iar pe măsură ce continuă să se prăbuşească în ele însele, căldura generată de acest colaps le aprinde şi ele devin stele. Iar în Planşa 6 avem o dovadă a formării de noi stele.

Deci aşa se nasc stelele, atunci când gazul se strânge prea tare din cauza gravitației. Uneori, când explodează, stelele regurgitează praf şi gaze, iar acestea se strâng din nou pentru a forma noi stele – pare a fi o mişcare perpetuă.

V-am arătat deja că gravitația se extinde pe mari distanțe, dar Newton a spus că orice atrage orice altceva. Chiar este adevărat că două obiecte se atrag reciproc? Putem oare efectua un test direct şi nu doar să aşteptăm să



1947



1954

Planșa 6

vedem dacă planetele se atrag unele pe altele? O încercare directă a fost efectuată de către Cavendish,* folosind echipamentul din Figura 6. Ideea era să se suspende orizontal o tijă cu două bile la capete, prin intermediul unui fir foarte, foarte fin de cuarţ, iar în dreptul lor să se aşeze două sfere masive de plumb, aşa ca în desen. Ca urmare a atracţiei exercitate de sfere, firul urma să se răsucească puţin şi, într-adevăr, s-a observat o forţă gravitaţională infimă între obiecte de dimensiuni obişnuite. Valoarea forţei dintre sfere a putut fi măsurată, Cavendish numind acest experiment „cântărirea Pământului". Cu grija şi pedanţa învăţământului de astăzi, noi nu i-am lăsa pe studenţii noştri să spună aşa; ar trebui să spună „măsurarea masei Pământului". Prin experiment direct,

Cavendish a fost în stare să măsoare forţa, cele două mase, şi distanţa dintre ele, determinând astfel constanta gravitaţională *G*. Veţi spune: „Da, dar în cazul Pământului cunoaştem forţa de atracţie, masa obiectului atras şi distanţa faţă de centrul Pământului, dar nu ştim nici masa acestuia, nici constanta gravitaţională, ci numai produsul lor." Tocmai prin măsurarea constantei gravitaţionale a putut fi determinată masa Pământului, cunoscând forţa lui de atracţie asupra unui corp.

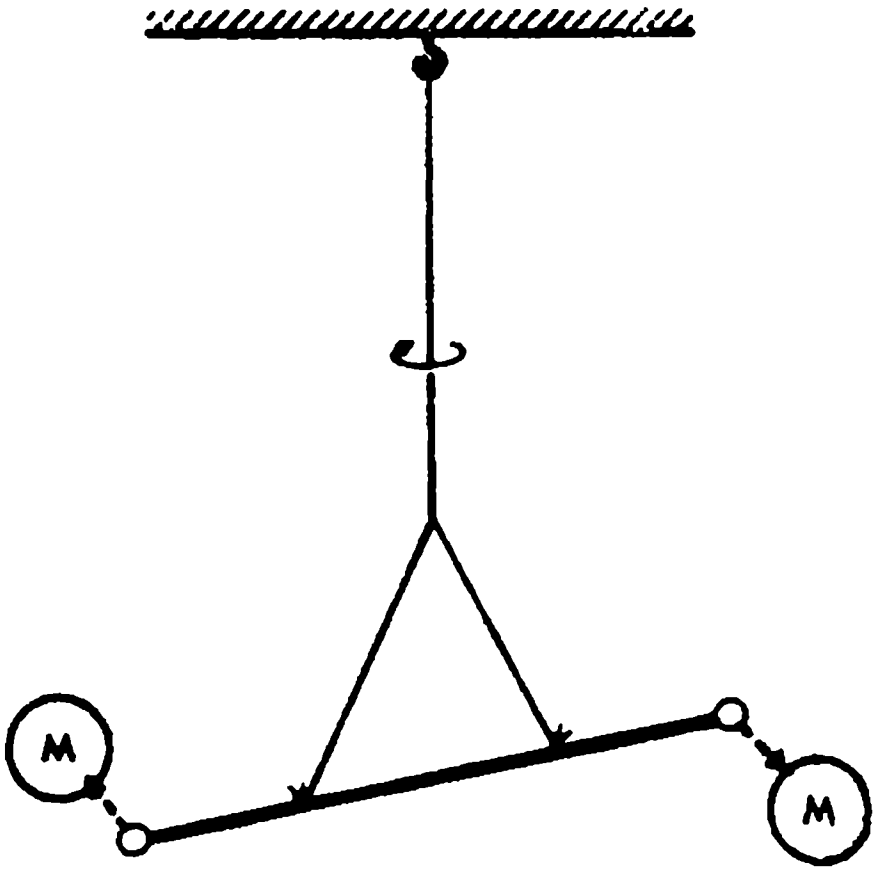


Figura 6

Acest experiment a constituit în mod indirect prima determinare a masei sferei pe care trăim. Este o realizare excepţională, şi cred că din acest motiv Cavendish şi-a numit experimentul „cântărirea Pământului", şi nu „determinarea constantei din Legea Atracţiei Universale". În aceeaşi ordine de idei, el măsura astfel concomitent şi masa Soarelui şi a orice altceva, căci forţa de atracţie a Soarelui este şi ea cunoscută de aceeaşi manieră.

Este foarte interesantă o altă verificare a Legii Atracţiei Universale, şi anume dacă forţa de atracţie este exact proporţională cu masa. Dacă da, şi dacă reacţia corpului este proporţională cu forţa, atunci mişcările induse de

---

* Henry Cavendish, 1731-1810, fizician şi chimist englez.

forță, adică modificările vitezei, sunt invers proporționale cu masele. Aceasta înseamnă că două obiecte cu mase diferite aflate într-un câmp gravitațional, îşi vor schimba viteza în acelaşi fel; sau, altfel spus, că două obiecte diferite aflate în vid vor cădea la fel pe Pământ, indiferent de masa lor. Acesta este vechiul experiment al lui Galilei din turnul înclinat din Pisa. Înseamnă, de exemplu, că un obiect din interiorul unui satelit artificial se va roti în jurul Pământului exact la fel ca unul din afară, părând astfel a pluti în mijlocul cabinei. Faptul că forța este exact proporțională cu masa şi că reacțiunile sunt invers proporționale cu masa are această consecință interesantă.

Cât este de exactă legea? Acest lucru a fost măsurat în 1909, într-un experiment efectuat de un bărbat pe nume Eötvös,* iar mai recent şi mai precis, de către Dicke,** şi putem actualmente să spunem că el se verifică până la o acuratețe de 1 la 10.000.000.000. Forțele sunt exact proporționale cu masele. Cum este oare posibil să se măsoare ceva cu o asemenea exactitate? Să presupunem că vrem să verificăm valabilitatea legii în cazul atracției Soarelui. Ştiți că Soarele ne atrage pe toți, inclusiv Pământul, dar să presupunem că dorim să vedem dacă forța de atracție este exact proporțională cu inerția. Inițial experimentul a fost efectuat cu lemn de santal; apoi s-a folosit plumb şi cupru, iar acum se utilizează polietilenă. Pământul se roteşte în jurul Soarelui, aşa încât obiectele sunt aruncate înspre în afară din cauza inerției, în măsura în care ele prezintă această proprietate. Însă ele sunt atrase de Soare în măsura în care au masă, conform Legii Atracției Universale. Astfel, dacă sunt atrase de Soare într-o proporție diferită de cea în care sunt aruncate înspre înafară de către inerție, unul va fi împins înspre Soare, pe când un altul va fi împins în direcție opusă. Deci, dacă fixăm două astfel de corpuri la capetele tijei din dispozitivul lui Cavendish, firul de cuarț se va răsuci înspre Soare. S-a observat cu precizia de mai sus că el nu se răsuceşte, aşa încât ştim cu exactitate că atracția Soarelui asupra obiectelor este proporțională cu efectul centrifug al inerției; prin urmare, forța de atracție este perfect proporțională cu coeficientul inerției; altfel spus, cu masa.

Un aspect anume este în mod special interesant: legea de inversă proporționalitate cu pătratul distanței mai apare şi în alte locuri – de pildă, în legile electrostaticii. În acest caz este vorba de forțele între sarcini electrice,

---

* Baronul Roland von Eötvös, 1848-1919, fizician maghiar.

** Robert Henry Dicke, fizician american.

şi s-ar putea crede că inversa proporţionalitate a forţei cu pătratul distanţei va fi având cine ştie ce semnificaţie profundă. Nimeni nu a reuşit vreodată să interpreteze electricitatea şi gravitaţia ca aspecte ale unui acelaşi lucru. Actualmente teoriile şi legile noastre din cadrul fizicii constituie o bogată colecţie de părţi disparate, care nu se îmbină prea bine. Nu dispunem de o structură din care să se deducă totul; avem mai multe piese care nu se potrivesc între ele. Acesta este motivul pentru care în aceste prelegeri, în loc să vă pot spune care este *legea* fizicii, trebuie să vă vorbesc despre lucrurile pe care diversele legi le au în comun; nu înţelegem legătura dintre ele. Însă ceea ce este ciudat este faptul că există anumite lucruri comune celor două pe care le-am menţionat. Să mai privim o dată legea electrostaticii.*

Forţa variază invers proporţional cu pătratul distanţei, dar aspectul cel mai remarcabil este imensa diferenţă între tăriile forţelor electrică şi gravitaţională. Cei care vor să regăsească electrostatica şi gravitaţia pornind de la un acelaşi lucru, descoperă că prima este cu mult mai puternică decât cealaltă, astfel încât este greu de crezut că ele au aceeaşi origine. Cum se poate afirma că ceva este mai puternic decât altceva, din moment ce acest lucru depinde de câtă sarcină electrică şi câtă masă se iau în calcul? Nu putem vorbi despre cât de puternică este gravitaţia spunând „fie un calup de cutare dimensiune", întrucât ar însemna că *noi* alegem dimensiunea. O putem însă face dacă ne raportăm la ceva produs de natură – propriile ei mărimi, care să nu aibă nici o legătură cu incii, ori cu anii, ori cu orice altă dimensiune a noastră. Dacă alegem o particulă fundamentală precum electronul – oricare alta ar da alt rezultat, dar pentru a ne face o idee nu contează alegerea – două astfel de entităţi se resping din punct de vedere electric cu o forţă invers proporţională cu pătratul distanţei, şi se atrag din punct de vedere gravitaţional cu o forţă invers proporţională cu pătratul distanţei.

Întrebare: care este raportul între forţa gravitaţională şi forţa electrică? Acesta este ilustrat în Figura 7. Raportul dintre atracţia gravitaţională şi respingerea electrostatică este dat de un număr fracţionar cu 42 de zerouri după virgulă. Acuma, aici se ascunde un mister adânc. De unde ar putea proveni un număr aşa incomensurabil? Dacă am avea o teorie din care să deducem ambele fenomene, cum ar putea proveni ele atât de disproporţionat? Ce ecuaţie ar putea avea o soluţie care pentru două tipuri de forţe să ne dea o atracţie şi respectiv o respingere aflate într-un raport atât de extraordinar?

---

* Legea lui Coulomb (n.t.)

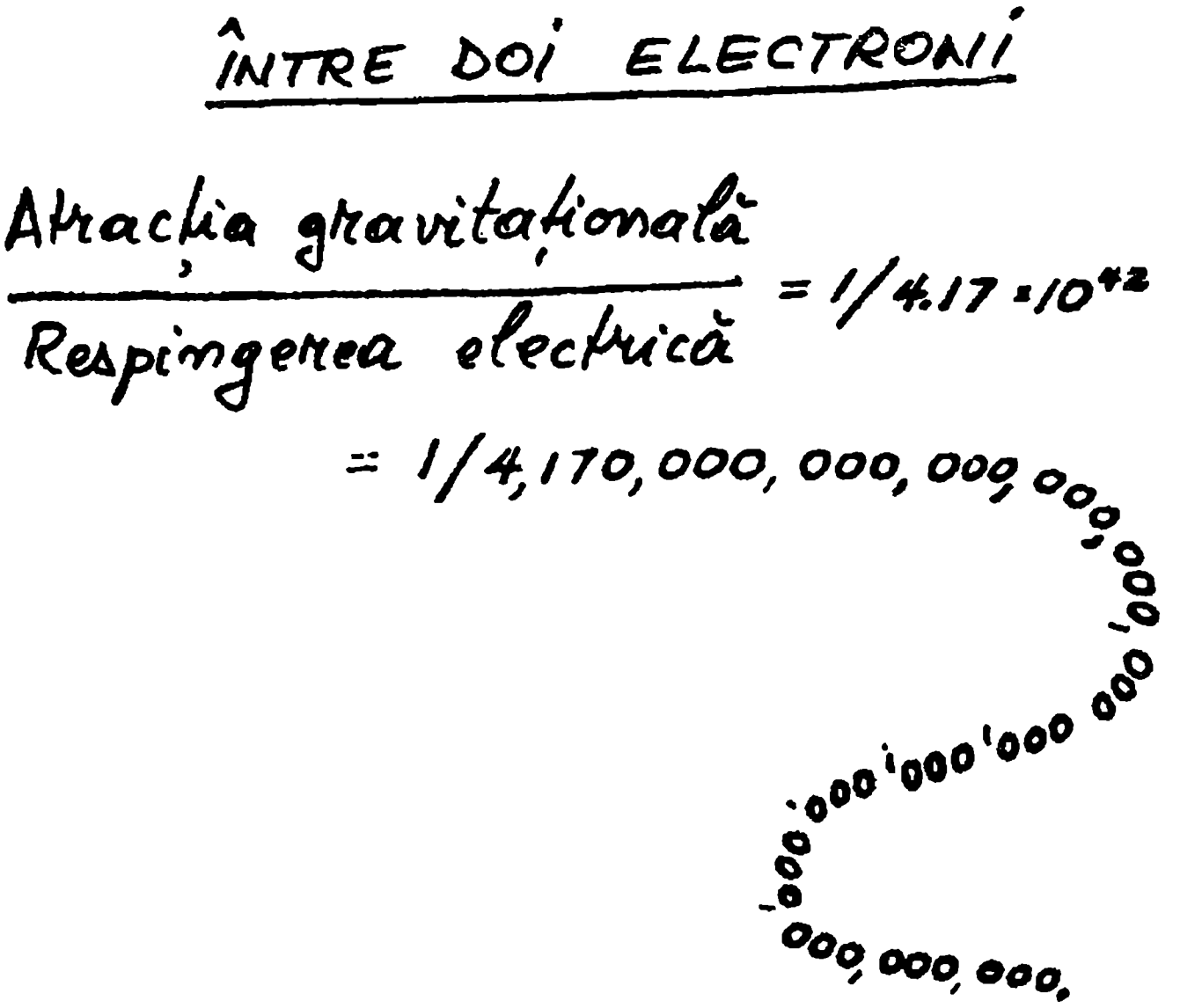


Figura 7

Oamenii au căutat să vadă dacă un astfel de raport apare şi în alte locuri. Ei speră să mai existe şi vreun alt număr atât de mare. Dacă e pe-aşa, ce-ar fi să luăm, de exemplu, diametrul Universului împărţit la diametrul unui proton – destul de ciudat, dar acesta este tot un număr cu 42 de cifre. Şi astfel, s-ar putea face ipoteza interesantă că cele două rapoarte reprezintă acelaşi lucru. Însă dimensiunea Universului creşte cu timpul, iar asta ar însemna ca şi constanta gravitațională să se schimbe cu timpul; deşi ar fi posibil, nu avem nici o dovadă că aşa stau lucrurile. Există câteva indicii parţiale care infirmă modificarea constantei gravitaționale într-o astfel de manieră. Aşa încât acest număr uriaş rămâne un mister.

Pentru a încheia cu teoria gravitației, trebuie să mai menționez două lucruri. Unul este acela că Einstein a trebuit să modifice Legea Atracției Universale în concordanţă cu principiile relativității enunțate de el. Primul dintre acestea spune că „x“ nu se poate întâmpla instantaneu, pe când teoria lui Newton afirmă că forța este instantanee. Modificările pe care a trebuit să le aducă legii lui Newton au efecte foarte mici. Unul dintre ele este acela că toate masele se află în cădere, lumina constituie energie, iar energia este

echivalentă cu o masă. Deci lumina se află în cădere, ceea ce înseamnă că lumina care trece pe lângă Soare este deviată; aşa şi este. De asemenea, în teoria lui Einstein forța gravitațională este uşor modificată, astfel încât să dea fix socoteală de extrem de micile discrepanțe sesizate în mişcarea lui Mercur.

În fine, în legătură cu legile fizicii la scară microscopică, s-a descoperit că la acele dimensiuni comportarea materiei ascultă de legi foarte diferite de cele de la scara macroscopică. Astfel încât întrebarea este: cum arată gravitația la scară mică? Aceasta se numeşte Teoria Cuantică a Gravitației. Actualmente nu există Teoria Cuantică a Gravitației. Nu am reuşit să elaborăm o teorie care să fie complet consistentă cu Principiul Incertitudinii şi cu celelalte principii din mecanica cuantică.

Îmi veți spune: „Da, ne-ați explicat ce se întâmplă, dar ce este gravitația? De unde provine? Ce reprezintă? Vreți să ziceți că o planetă se uită la Soare, vede cât de departe este acesta, calculează inversul pătratului distanței şi apoi hotărăşte să se mişte potrivit legii?“ Cu alte cuvinte, deşi am enunțat legea matematică, nu am oferit nici un indiciu privitor la mecanismul subiacent. Voi discuta posibilitatea de a face acest lucru în prelegerea următoare, intitulată „Relația dintre matematică şi fizică“.

Aş dori să închei prelegerea de față subliniind câteva caracteristici comune ale gravitației şi ale altor legi pe care le-am menționat pe parcurs. În primul rând, exprimarea ei se face de manieră matematică; la fel stau lucrurile şi cu celelalte legi. În al doilea rând, nu este exactă: Einstein a fost nevoit să o modifice, şi ştim că tot nu este încă absolut corectă, căci mai avem de adăugat la ea teoria cuantică. Aşa şi cu celelalte legi – nu sunt exacte. Există totdeauna o umbră de mister, un loc în care mai avem încă de migălit. Locul acela ar putea sau nu să reprezinte o proprietate a naturii, dar în mod sigur el constituie un lucru comun tuturor legilor pe care le cunoaştem astăzi. Poate e doar o lipsă de cunoştințe din partea noastră.

Însă cel mai impresionant fapt este acela că gravitația este simplă. Este simplu de enunțat principiile ei în mod complet, astfel încât să nu lăsăm nici o urmă de evazivitate care să permită cuiva schimbarea ideilor legii. Este simplă, şi ca atare este frumoasă. Este simplă în forma ei. Nu vreau să spun că este simplă în acțiunea ei – mişcările diferitelor planete şi perturbațiile cauzate de unele altora pot fi cât se poate de complicat de determinat, iar urmărirea mişcărilor tuturor acelor stele dintr-o aglomerare globulară este mult dincolo de puterile noastre. Este complicată în acțiunea ei, dar tiparul

care stă la bază, ori sistemul care se ascunde în spatele întregului acest lucru, este simplu. Acest aspect este comun tuturor legilor: toate se dovedesc a fi chestiuni simple, chiar dacă sunt complexe în manifestarea lor efectivă.

În fine, este vorba despre universalitatea legii, despre faptul că ea se extinde pe distanțe atât de imense, lucru ce i-a permis lui Newton, analizând teoretic Sistemul Solar, să prevadă ce ar urma să se întâmple în cadrul unui experiment ca cel al lui Cavendish. Dacă micul model de sistem solar cu cele două bile care se atrag este la o scară de milioane şi milioane de ori mai mică, la polul opus se situează galaxiile, care sunt de milioane şi milioane de ori mai mari decât Sistemul Solar, şi care se atrag exact după aceeaşi lege. Natura utilizează doar firele cele mai lungi pentru a-şi țese urzeala, aşa încât orice petic din materialul ei dezvăluie organizarea întregii tapiserii.

2 RELAȚIA DINTRE MATEMATICĂ ŞI FIZICĂ

Dacă analizăm lucrurile la care se aplică matematica şi fizica, este de la sine înţeles că matematica foloseşte atunci când este vorba despre numere mari, în situaţii complexe. În biologie, de exemplu, acţiunea unui virus asupra unei bacterii este nematematică. Privit la microscop, un mic virus neastâmpărat găseşte un loc anume pe o bacterie cu formă ciudată – există bacterii cu tot felul de forme – şi îşi transferă sau nu ADN-ul în interiorul acesteia. Totuşi, dacă facem experimentul cu milioane şi milioane de bacterii şi de viruşi, atunci, prin mediere, stabilim o sumedenie de lucruri în legătură cu aceştia. Pe ansamblu, putem folosi matematica pentru a vedea dacă viruşii se dezvoltă în cadrul bacteriilor, cu ce secvenţe noi, şi în ce procente; astfel, studiem genetica, mutaţiile şi aşa mai departe.

Pentru a lua un alt exemplu ceva mai banal, să ne închipuim o tablă enormă pe care se poate juca şah sau dame. Operaţia efectivă ce caracterizează o mutare nu este matematică – sau este foarte simplă din punct de vedere matematic. Însă vă puteţi imagina că pe o tablă enormă, cu o puzderie de piese, analizarea celor mai bune mutări, sau a mutărilor convenabile şi neconvenabile, trebuie făcută printr-un raţionament de o manieră profundă, care să implice faptul că anterior o persoană se va fi gândit mult timp la acestea. În acel moment chestiunile devin matematică, şi reclamă o gândire abstractă. Un alt exemplu îl reprezintă circuitele basculante ale calculatoarelor. Dacă avem un circuit basculant care se află fie într-o stare fie în cealaltă, chiar dacă matematicienilor le place să pornească în teoria lor de la acest aspect, situaţia nu are nimic matematic în sine. Dar dacă luăm în considerare toate conexiunile şi legăturile între elemente, atunci, pentru a stabili ce va face un circuit complex, este nevoie de matematică.

Aş dori să precizez din capul locului că matematica îşi găseşte o aplicabilitate extraordinară în fizică, în analizarea detaliată a fenomenelor din cadrul unor situaţii complicate. Astfel, ea stabileşte regulile de bază ale jocului. Dacă ar trebui să vorbesc numai despre relaţia dintre matematică şi fizică, cea mai mare parte a timpului ar trebui să o dedic discutării aspectului de mai sus. Însă din moment ce aceasta face parte dintr-o serie de prelegeri cu privire la caracterul legilor fizicii, nu am timp să vă povestesc ce se întâmplă în situaţii complicate, ci voi trece imediat la o altă chestiune, cea a caracterului legilor fundamentale.

Revenind la jocul nostru de şah, legile fundamentale sunt constituite de regulile după care se mută piesele. Pentru a determina care mutare ar fi bună în anumite circumstanţe date, se poate recurge la aplicarea matematicii într-o situaţie complexă; dar pentru a descrie caracterul fundamental al legilor de bază, este nevoie de foarte puţină matematică elementară. În cazul şahului, regulile pot fi pur şi simplu enunţate în cuvinte.

Lucrul ciudat în legătură cu fizica este faptul că, până şi pentru legile fundamentale, tot avem nevoie de matematică. O să vă dau două exemple, unul în care chiar că nu ne trebuie matematica, şi altul în care ne trebuie. Primul exemplu este o lege din fizică numită Legea lui Faraday, care spune că în cazul fenomenului de electroliză, cantitatea de substanţă depusă pe catod este proporţională cu intensitatea curentului electric şi cu intervalul de timp cât trece acesta. Aceasta înseamnă că ea este proporţională cu sarcina electrică ce trece prin circuit. Sună foarte matematic, dar ceea ce se întâmplă în fapt este că fiecare electron care trece prin firele conductoare transportă câte o sarcină electrică. De exemplu, în anumite situaţii, pentru a se depune pe catod un atom, este nevoie ca prin circuit să trecă un electron; astfel, numărul de atomi depuşi este în mod necesar egal cu numărul de electroni transportaţi, şi deci cu sarcina electrică ce a trecut prin circuit. Aşadar, această lege, aparent matematică, nu are nimic profund la bază, ea nereclamând reale cunoştinţe matematice. Faptul că pentru a se depune un atom este nevoie de un electron, bănuiesc că poate fi numit matematică, însă nu este genul de matematică la care mă refer eu aici.

Pe de altă parte, să luăm Legea Atracţiei Universale a lui Newton, cu aspectele ei discutate data trecută. V-am scris ecuaţia

$$F = G\,\frac{m\,m'}{r^2}$$

numai ca să vă impresionez cu rapiditatea cu care simbolurile matematice transmit informaţie. V-am spus că forţa este direct proporţională cu produsul

maselor celor două obiecte şi invers proporţională cu pătratul distanţei dintre ele; de asemenea, v-am precizat că un corp reacţionează la aplicarea unei forţe modificându-şi viteza, mişcarea, pe direcţia forţei, cu cantităţi direct proporţionale cu forţa şi invers proporţionale cu masa. De acord, aceasta este o exprimare în cuvinte, şi nu era neapărat nevoie să vă scriu ecuaţia. Cu toate acestea, afirmaţia respectivă constituie ceva matematic, iar întrebarea este cum poate reprezenta ea o lege fundamentală? Ce face planeta? Se uită la Soare, vede cât de departe este, şi se hotărăşte să calculeze cu numărătoarea ei internă inversul pătratului distanţei, ca să ştie cât de repede să se mişte? Aşa ceva cu siguranţă nu înseamnă o explicare a mecanismului gravitaţiei! Probabil că aţi dori să pătrundeţi mai în amănuntul fenomenului, şi mulţi oameni chiar au încercat asta. Primul întrebat în legătură cu teoria a fost chiar Newton: „Ce înseamnă legea asta? Ea nu ne spune nimic.“ Răspunsul lui a fost: „Legea vă spune *cum* se mişcă planeta, şi asta ar trebui să fie de ajuns. V-am explicat cum se mişcă, nu de ce se mişcă ea.“ Însă adeseori lumea nu se mulţumeşte fără un mecanism, fapt pentru care aş dori să vă prezint una din multele teorii care au fost inventate în acest sens. Această teorie sugerează că efectul de ansamblu s-ar datora unui număr mare de acţiuni, ceea ce ar explica natura matematică a legii.

Să presupunem că peste tot în lume există o puzderie de particule care trec cu mare viteză prin lucruri. Ele vin în mod egal din toate direcţiile, trecând nestingherite, şi, doar uneori, câte una se loveşte de noi ca de o ţintă. Şi noi şi Soarele suntem practic transparenţi pentru aceste particule; practic, dar nu complet, ceea ce conduce la ciocnirile respective. Iată ce se întâmplă în acest caz (fig. 8).

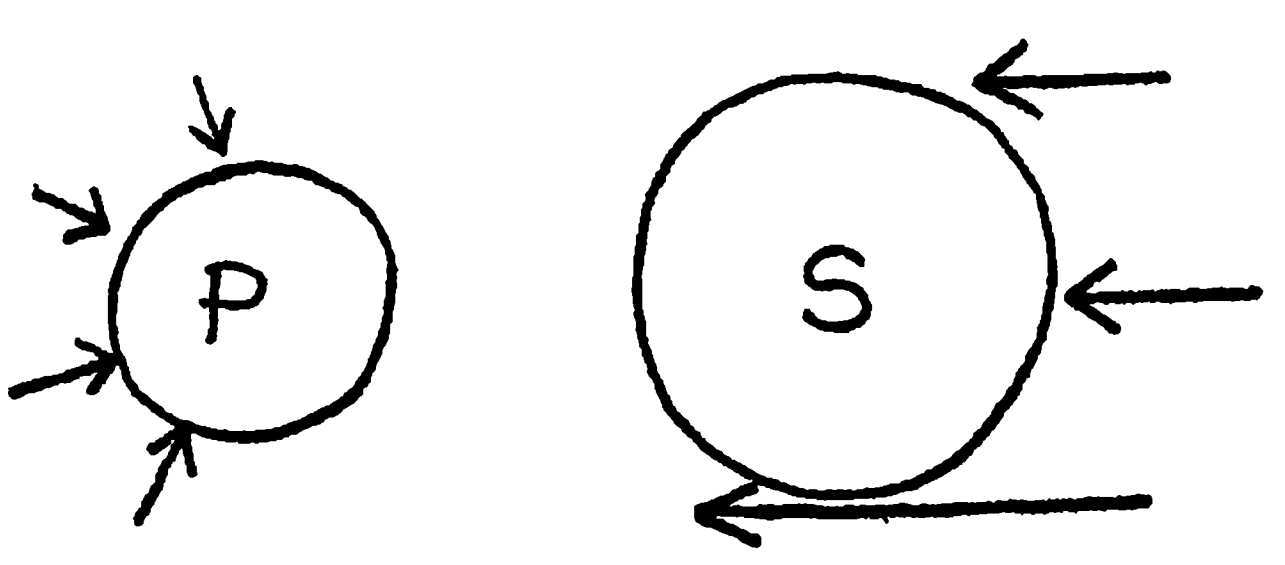


Figura 8

S reprezintă Soarele, iar P Pământul. Dacă nu ar exista Soarele, particulele ar bombarda Pământul din toate părţile, iar cele câteva care ar interacţiona cu acesta i-ar imprima mici impulsuri, ca la ciocniri. Ele nu ar

urni Pământul în nici o direcție, pentru că ar veni tot atâtea şi dintr-o parte, şi din cealaltă, şi de jos, şi şi de sus. Însă cum Soarele se află acolo, o parte din particulele care ar veni din acea direcție ar fi absorbite de acesta, şi nu ar mai ajunge la noi. Astfel, numărul de particule care ar veni spre Pământ din direcția Soarelui ar fi mai mic decât al celor din celelalte direcții, care nu au nici un obstacol. Este uşor de arătat că proporția direcțiilor pe care particulele sunt împiedicate este cu atât mai mică cu cât Soarele este mai departe. În fapt, Soarele ne apare mai mic fix invers proporțional cu pătratul distanței. În consecință, Pământul ar primi un impuls înspre Soare invers proporțional cu pătratul distanței. Iar acest impuls ar fi rezultatul a sumedenie de acțiuni foarte simple, banale lovituri, unele după altele, din toate direcțiile. Astfel, ciudățenia relației matematice s-ar diminua foarte mult, căci operația fundamentală ar fi mult mai simplă decât calcularea inversului pătratului distanței. Acest model, al unor particule ricoşând în toate direcțiile, generează calculul respectiv.

Singurul necaz în legătură cu acest mecanism este că, din alte motive, el nu ține. Orice teorie imaginată trebuie analizată în raport cu *toate* consecințele posibile, pentru a vedea dacă ea nu mai prezice şi altceva. Iar cea de mai sus o face: dacă Pământul se află în mişcare, atunci el este lovit din față de mai multe particule decât din spate. (Dacă fugiți prin ploaie, din față vă lovesc mai mulți stropi decât din spate, deoarece alergați înspre ei.) Deci, dacă Pământul se mişcă, el intră în particulele care îi vin din față şi fuge de cele care îl urmăresc. Aşadar, din față va fi lovit de mai multe particule decât din spate, astfel apărând o forță opusă oricărei mişcări. Această forță ar încetini Pământul pe orbită, şi cu siguranță că el nu ar fi rezistat timp de cele trei sau patru miliarde de ani (cel puțin) de când se roteşte în jurul Soarelui. Şi cu asta, teoria a căzut. Veți spune: „Ei bine, a fost o încercare frumoasă; măcar pentru un moment am reuşit să renunțăm la legea matematică. Poate că o să se inventeze una mai bună.“ Poate, pentru că nimeni nu ştie ce va fi mâine. Dar din vremea lui Newton şi până în ziua de astăzi, nimeni nu a reuşit să producă o descriere teoretică a mecanismului matematic, sau să nu prezică cine ştie ce fenomen neadevărat. Deci, actualmente, în afară de forma matematică, nu există nici un model al teoriei gravitației.

Dacă ea ar fi singura teorie cu această caracteristică, ar constitui o curiozitate şi oarecum o platitudine. Însă ceea ce se constată în realitate este că pe măsură ce cercetăm lumea, găsim tot mai multe legi, şi cu cât pătrundem mai adânc în tainele naturii, cu atât acestă afecțiune se amplifică. Toate legile noastre reprezintă afirmații pur matematice, cu un formalism

extrem de complex şi abstract. Enunţul Legii Atracţiei Universale dat de Newton, constituie matematică relativ simplă. Pe măsură ce continuăm, ea devine tot mai abstractă. De ce? N-am nici cea mai vagă idee. Intenţia mea este doar să vă aduc la cunoştinţă acest lucru. Scopul acestei prelegeri este pur şi simplu acela de a sublinia faptul că este imposibil de descris plenar frumuseţea din legile naturii într-o manieră accesibilă oamenilor, dacă aceştia nu posedă o înţelegere profundă a matematicii. Îmi pare rău, dar se pare că aşa stau lucrurile.

Aţi putea spune: „În regulă, dacă nu există nici o explicaţie a legii, atunci de ce să nu ne ziceţi măcar ce *înseamnă* ea? De ce să nu folosiţi cuvinte în loc de simboluri? Matematica este doar un limbaj, şi dorinţa dumneavoastră este să ne puteţi traduce acest limbaj.“ De fapt, cu răbdare, chiar pot, şi cred că în parte am şi făcut-o. Aş putea merge mai departe, să vă explic mai în detaliu că ecuaţia amintită însemnă că dacă distanţa se dublează, forţa se reduce la un sfert, şi aşa mai departe. Aş putea converti toate simbolurile în cuvinte. Altfel spus, aş putea fi drăguţ cu cei fără pregătire de specialitate, care stau şi aşteaptă încrezători să le explic ceva. Tot felul de oameni au tot felul de reputaţii cu privire la priceperea lor de a explica nespecialiştilor, pe înţelesul lor, aceste chestiuni dificile şi abstracte. Pe urmă, amatorul se apucă şi caută carte după carte, în speranţa că va găsi vreuna care să evite complicaţiile ce intervin inerent până la urmă chiar şi la cei mai pricepuţi dintre popularizatorii de gen. Pe măsură ce citeşte, el descoperă o tot mai crescândă confuzie generală, cu enunţuri complicate după enunţuri complicate, cu chestiuni greu de înţeles după chestiuni greu de înţeles, şi toate fără vreo legătură aparentă între ele. Cartea devine obscură, şi el speră că poate în vreo alta va fi existând o explicaţie... Autorul acesta era cât pe-aci să reuşească... poate că vreun confrate de-al lui va fi făcut-o.

Eu însă nu cred că aşa ceva este posibil, din cauză că matematica *nu* este doar un limbaj. Matematica înseamnă limbaj plus raţionament; limbaj plus logică. Matematica este o unealtă pentru gândit. În fapt, ea reprezintă colecţia de rezultate ale raţionamentelor şi ideilor anumitor persoane. Prin intermediul matematicii este posibilă stabilirea unei legături între un enunţ şi altul. De exemplu, pot afirma că forţa este orientată spre Soare. De asemenea, pot spune, cum de altfel am şi făcut-o, că planeta se mişcă astfel încât, dacă trasez o dreaptă ce uneşte Soarele şi planeta, iar apoi trasez încă una după un anumit interval de timp, cum ar fi trei săptămâni, aria măturată de raza vectoare este exact aceeaşi cu cea din următoarele trei săptămâni, şi din următoarele trei, şi aşa mai departe, pe toată perioada rotaţiei. Pot explica

minuţios ambele afirmaţii, dar nu pot explica de ce ele înseamnă acelaşi lucru. Se dovedeşte că toate aceste legi şi reguli neobişnuite, care v-au fost explicate pe rând în amănunt, şi care alcătuiesc aparenta enormă complexitate a naturii, sunt de fapt strâns întrepătrunse. Totuşi, dacă nu daţi matematicii importanţa cuvenită, nu puteţi sesiza, în multitudinea de fapte diverse, logica ce vă permite să ajungeţi de la un fapt la altul.

Ar putea părea de necrezut că este posibil de demonstrat faptul că dacă forţele sunt orientate înspre Soare, atumci în intervale de timp egale se mătură arii egale. Aşa încât, dacă îmi permiteţi, voi da o demonstraţie care arată că aceste două lucruri chiar sunt echivalente, pentru ca dumneavoastră să puteţi aprecia mai mult decât simpla lor enunţare. Voi arăta că cele două legi sunt astfel interconectate încât, făcând doar un simplu raţionament, puteţi ajunge de la una la alta; iar matematica înseamnă raţionament organizat. Veţi aprecia atunci frumuseţea relaţiei dintre enunţuri. Să demonstrăm faptul că dacă forţele sunt orientate înspre Soare, atunci în intervale de timp egale se mătură arii egale.

Fie un soare şi o planetă (fig. 9) şi să presupunem că la un anumit moment de timp planeta se află în poziţia 1. Ea se mişcă astfel încât, să zicem, peste o secundă se găseşte în poziţia 2. Dacă soarele nu exercită nici

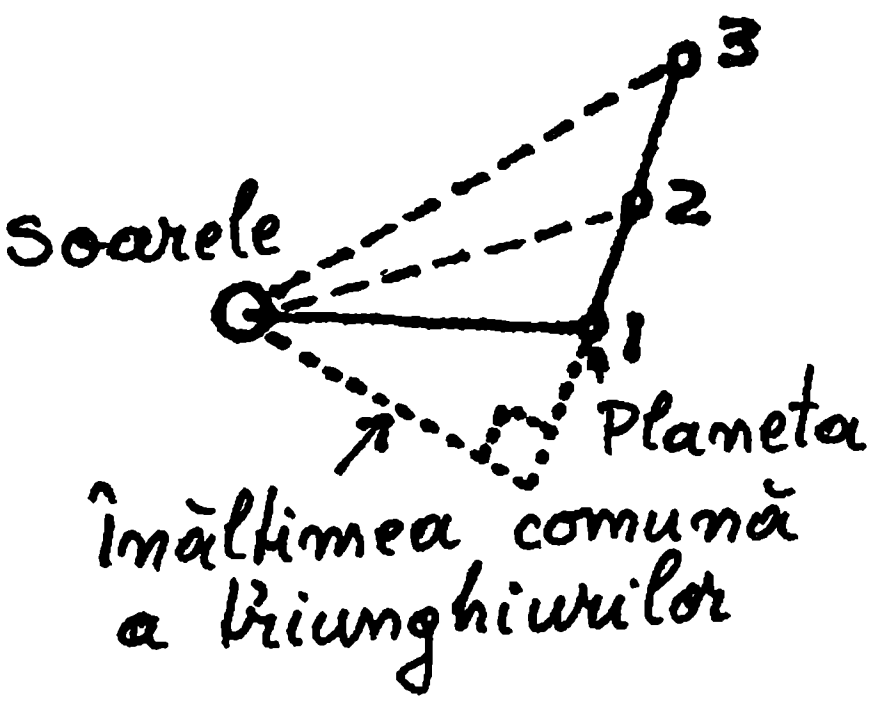


Figura 9

o forţă asupra planetei, atunci, conform Principiului Inerţiei al lui Galilei, aceasta continuă să se mişte în linie dreaptă. Astfel, după un interval de timp egal cu primul, în a doua secundă, ea se va fi deplasat exact pe aceeaşi distanţă şi exact pe aceeaşi direcţie, în poziţia 3. Vom arăta mai întâi că în lipsa *oricărei* forţe, ariile măturate în intervale de timp egale sunt egale. Vă reamintesc faptul că aria unui triunghi este egală cu jumătate din produsul dintre bază şi înălţime, unde înălţimea înseamnă perpendiculara coborâtă din

vârful opus pe bază. Dacă triunghiul este obtuzunghic (fig. 10), atunci înălţimea este AD şi baza este BC. Să comparăm acum ariile care ar fi măturate dacă soarele nu ar exercita nici o forţă (fig. 9).

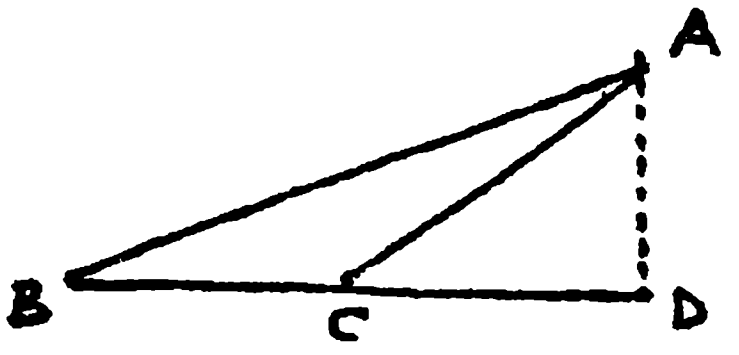


Figura 10

Amintiţi-vă că cele două distanţe, 1-2 şi 2-3, sunt egale. Întrebarea este: sunt cele două arii egale? Fie triunghiul alcătuit de soare şi de cele două puncte 1 şi 2. Cât este aria lui? Este egală cu baza 1-2 înmulţită cu înălţimea coborâtă pe bază din punctul S şi împărţită la doi. Dar aria celuilalt triunghi, descris în mişcarea de la 2 la 3? Aceasta este egală cu baza 2-3 înmulţită cu aceeaşi perpendiculară coborâtă de la soare şi împărţită la doi. Cele două triunghiuri au aceeaşi înălţime şi, aşa cum am precizat, au baze egale, deci au aceeaşi arie.

Până aici este în regulă: dacă nu există forţă din partea soarelui, ariile măturate în intervale de timp egale sunt egale. Dar *există* forţă din partea soarelui. În intervalul de timp 1-2-3 soarele atrage continuu planeta drept spre el, modificându-i acesteia mişcarea. Pentru o bună aproximare, vom lua poziţia centrală 2 ca pe o medie, şi vom considera că efectul pe ansamblu în intervalul de timp 1-3 îl constituie schimbarea traiectoriei cu o anumită cantitate pe direcţia dreptei 2-S (fig. 11). Aceasta înseamnă că, spre deosebire de cazul în care nu există forţe şi obiectele îşi continuă mişcarea pe dreapta 1-2, în cazul influenţei soarelui deplasarea este alterată cu o anumită cantitate orientată paralel cu dreapta S-2. Astfel, deplasarea ulterioară reprezintă o combinaţie între ceea ce vroia să facă planeta şi schimbarea impusă de acţiunea soarelui. Deci, planeta nu ajunge exact în poziţia 3, ci în poziţia 4. Am dori acum să comparăm ariile triunghiurilor S23 şi S24, şi vă voi dovedi că ele sunt egale. Au aceeaşi bază, S-2. Au oare şi aceeaşi înălţime?

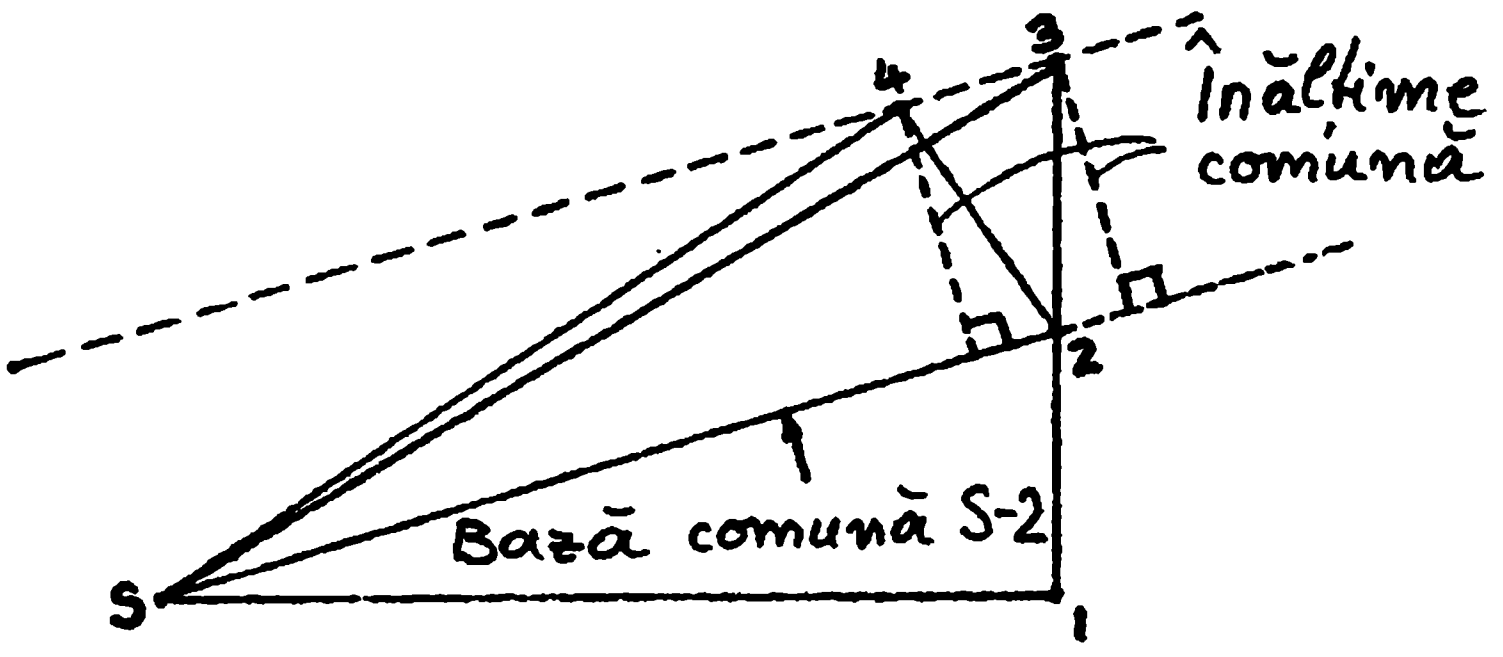


Figura 11

Bineînțeles, pentru că sunt cuprinse între linii paralele. Distanţa de la 4 la S-2 este egală cu cea de la 3 la S-2 (dusă pe prelugirea acesteia din urmă). Aşadar, aria triunghiului S24 este aceeaşi cu cea a tri-unghiului S23. Mai devreme am demonstrat că S12 şi S23 au arii egale, deci ştim acum că S12 = S24. Prin urmare, în mişcarea efectivă a planetei pe orbită, ariile măturate în prima şi a doua secundă sunt egale. Prin intermediul acestui raționament putem sesiza o legătură între faptul că forţa este orientată înspre soare şi faptul că ariile sunt egale. Este că-i ingenios? L-am împrumu-tat direct din cartea lui Newton. El apare în *Principia* exact aşa cum îl vedeţi, inclusiv diagramele şi tot restul. Numai notaţiile diferă, pentru că Newton scria în latină, pe când noi folosim cifre arabe.

Newton a făcut toate demonstraţiile din cartea lui pe cale geometrică. Astăzi nu mai folosim un astfel de raționament. Utilizăm un gen de raționament analitic cu simboluri. Este nevoie de multă ingeniozitate pentru a trasa triunghiurile convenabile, a face observaţiile legate de arii şi a imagina calea demonstraţiilor. Metodele analitice au îmbunătăţit însă lucrurile, ele fiind mai rapide şi mai eficiente. Doresc să vă arăt cum se prezintă cele de mai sus în cadrul notaţiilor din matematica modernă, în care tot ce aveţi de făcut pentru a ajunge la rezultat este să scrieţi o grămadă de simboluri.

Este vorba despre cât de repede se mătură aria, lucru notat cu $\dot{A}$. Aria se mătură atunci când deviază raza vectoare, iar cantitatea care arată acest lucru este produsul dintre componenta perpendiculară pe raza vectoare a vitezei şi raza vectoare însăşi.* Aceasta se poate scrie ca produsul dintre vectorul de poziţie şi rata lui de schimbare, adică viteza.

$$\dot{\vec{A}} = \vec{r} \times \dot{\vec{r}}$$

Problema care se pune acum este dacă însuşi $\dot{A}$ variază la rândul lui. În principiu, acest lucru n-ar trebui să se întâmple. Ca atare, derivăm încă o dată expresia de mai sus; acest lucru se reduce la nişte mici scamatorii legate de punerea de noi puncte în locurile trebuincioase şi atât. Trucurile respective trebuie învăţate; ele reprezintă pur şi simplu un set de reguli pe care oamenii le-au văzut că se aplică în aceste situaţii. Vom scrie:

$$\ddot{\vec{A}} = \dot{\vec{r}} \times \dot{\vec{r}} + \vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = \vec{r} \times \frac{\vec{F}}{m}$$

---

* În mod riguros, mai trebuie împărţit la 2, dar pentru scopul demonstraţiei acest lucru este neesenţial. (n.t.)

Primul produs se efectuează între componenta vitezei perpendiculară pe viteză, şi viteza însăşi. El ne dă zero, căci orice vector este paralel cu el însuşi. Derivata de ordinul doi a razei vectoare, cea notată cu două puncte, mai poate fi gândită şi ca derivată de ordinul unu a vitezei, şi reprezintă acceleraţia corpului; ea este egală cu raportul dintre forţa totală şi masă.

Prin urmare, expresia de mai sus ne spune că rata de schimbare a ratei de măturare a ariei depinde de componenta perpendiculară pe vectorul de poziţie a forţei. Dar, din moment ce forţa este pe direcţia vectorului de poziţie,

$$\vec{r} \times \frac{\vec{F}}{m} = 0 \quad \text{sau} \quad \ddot{\vec{r}} = 0$$

Aşa cum a spus Newton, dacă nu există forţă perpendiculară pe raza vectoare, rata de variaţie a ariei rămâne constantă. Acest exemplu ilustrează cum nu se poate mai bine puterea analizei bazate pe diferite tipuri de notaţii. Newton ştia, mai mult sau mai puţin, să facă aceste lucruri, cu notaţii un pic diferite; însă el a preferat să scrie totul sub formă geometrică, pentru că a încercat să pacă posibilă citirea lucrării sale de către oricine. El este inventatorul analizei matematice, genul de calcul pe care tocmai vi l-am prezentat.

Cele de mai sus constituie o bună ilustrare a relaţiei dintre matematică şi fizică. Atunci când problemele în fizică devin dificile, este adesea posibil să aruncăm o privire în ograda matematicienilor, care poate au studiat deja astfel de lucruri şi au pus la punct o cale de raţionament pe care să o urmăm. Pe de altă parte, se prea poate ca ei să nu o fi făcut, caz în care suntem nevoiţi să ne inventăm propria cale de raţionament, pe care după aceea să o pasăm înapoi matematicienilor. Oricine chibzuieşte cu grijă la ceva, contribuie la cunoaşterea manierei în care stau lucrurile în acea privinţă; iar dacă îşi sintetizează ideile şi le trimite Departamentului de Matematică, cei de acolo le vor include în cărţi, ca pe un domeniu al matematicii. Aşadar, matematica reprezintă o modalitate de a ajunge la un set de enunţuri pornind de la un alt set de enunţuri. În mod evident, ea este de folos în fizică, deoarece ne confruntăm cu aceste feluri diferite de a vorbi despre lucruri, iar matematica ne permite să deducem consecinţe, să analizăm situaţii şi să modificăm legile în diferite maniere, pentru a stabili legături între tot soiul de enunţuri. Fapt este că volumul total de cunoştinţe ale unui fizician este foarte mic. El nu trebuie decât să ţină minte regulile care îl conduc dintr-un punct în altul şi

atât, căci diversele afirmații despre arii măturate în intervale de timp egale, forțe orientate pe direcția razei vectoare şi aşa mai departe, sunt toate interconectate prin raționamente.

Se naşte acum o întrebare interesantă. Există oare vreun loc de unde să se înceapă deducerea întregii tărăşenii? Există oare vreun tipar sau vreo ordine în natură pe baza cărora să putem pricepe că un anumit set de enunțuri este cel fundamental sau că un anumit set de enunțuri este cel mai bogat în consecințe? Matematica poate fi privită în două feluri, pe care, pentru scopul acestei cărți, le voi numi tradiția babiloniană şi tradiția greacă. Şcoala babiloniană de matematică îl pregătea pe elev într-o anumită chestiune punându-l să rezolve un număr mare de exemple, până când acesta se familiariza cu regula generală. De asemenea, el trebuia să cunoască multă geometrie, sumedenie de proprietăți ale cercului, Teorema lui Pitagora, formule de arii pentru cuburi şi triunghiuri; în plus, mai avea la dispoziție, într-o oarecare măsură, argumente pentru a trece de la o chestiune la alta. Pentru a rezolva ecuații complicate, existau tot felul de tabele cu cantități numerice. Totul era gata pregătit pentru efectuarea calculelor. Însă Euclid a descoperit că exista o metodă prin care toate teoremele geometriei puteau fi ordonate pornind de la un set de axiome extrem de simple. Atitudinea babiloniană – sau ceea ce eu numesc matematica babiloniană – este aceea de a cunoaşte toate diferitele teoreme şi multe dintre legăturile între ele, fără însă a realiza vreodată pe deplin că toate ar proveni dintr-un mănunchi de axiome. Matematica modernă de vârf se concentrează asupra axiomelor şi demonstrațiilor dintr-un cadru strict definit de convenții referitoare la ce este şi ce nu este acceptabil ca axiome. Geometria modernă pleacă de la ceva precum axiomele lui Euclid, le modifică până la perfecțiune, după care ne prezintă deducerea întregului sistem. De exemplu, nu ar fi de aşteptat ca o teoremă precum Teorema lui Pitagora (potrivit căreia suma ariilor pătratelor construite pe catetele unui triunghi dreptunghic este egală cu aria pătratului construit pe ipotenuză) să reprezinte o axiomă. Pe de altă parte, dintr-un alt punct de vedere asupra geometriei, cel al lui Descartes, teorema lui Pitagora constituie o axiomă. Aşa încât primul lucru pe care trebuie să îl acceptăm este acela că până şi în cadrul matematicii putem pleca din diferite locuri.

Dacă toate aceste diferite teoreme sunt interconectate prin intermediul raționamentelor, nu există efectiv nici o cale de a afirma „iată axiomele fundamentale“; căci, dacă în locul lor s-ar cunoaşte ceva diferit, s-ar putea urma un raționament pe altă cale. Este asemenea unui pod cu o grămadă de căi de acces, conectate în exces: dacă se prăbuşesc părți din el, poate fi

refăcut într-un alt mod. Actualmente, matematica tradiţională obişnuieşte să plece de la anumite idei particulare, alese drept axiome prin vreo convenţie oarecare, şi să ridice de acolo întregul eşafodaj. Ceea ce numesc maniera babiloniană revine la a spune: „Se întâmplă că ştiu asta şi asta, şi este posibil să mai cunosc şi altceva, şi rezolv totul pornind de la aceste lucruri. Poate că mâine voi uita ceva ce este adevărat, dar îmi voi aduce aminte altceva adevărat, astfel încât să pot reconstrui totul de la început. Nu am niciodată siguranţa punctului din care trebuie să pornesc şi a celui în care trebuie să ajung, dar de fiecare dată ştiu suficient de multe pentru ca, pe măsură ce anumite lucruri dispar din memorie, să le pot pune la loc iar şi iar."

Metoda de a porni tot timpul de la axiome nu este foarte eficientă în obţinerea de teoreme. Dacă vrei să rezolvi ceva la geometrie, nu este convenabil să trebuiască să pleci de fiecare dată de la axiome. Dacă îţi propui să reţii puţine lucruri din geometrie, poţi oricând ajunge la restul, dar este mai eficient să o faci pe cealaltă cale. A hotărî care sunt cele mai bune axiome nu constituie neapărat maniera cea mai bună de a naviga. În cadrul fizicii, avem nevoie de metoda babiloniană, şi nu de cea greacă euclidiană. Aş vrea să vă explic de ce.

Problema cu metoda euclidiană este de a găsi ceva un pic mai interesant sau important în legătură cu axiomele. Dar în cazul gravitaţiei, de exemplu, ne punem întrebarea: este oare mai important, mai de bază, sau constituie oare o axiomă mai bună, afirmaţia că forţa este orientată înspre Soare, ori afirmaţia că în intervale de timp egale sunt măturate arii egale? Dintr-un anumit punct de vedere, enunţul referitor la forţă este mai bun: dacă precizăm care sunt forţele, ne putem descurca cu un sistem cu multe particule, în care traiectoriile nu mai sunt eliptice, căci enumerarea forţelor înseamnă cunoaşterea interacţiunilor din sistem. În acest caz, teorema privitoare la arii egale nu este valabilă şi, prin urmare, considerăm că nu ea, ci legea forţei, ar trebui să fie axiomă. Pe de altă parte însă, pentru un sistem cu un număr mare de particule, principiul ariilor egale poate fi generalizat într-o altă teoremă. Aceasta din urmă este destul de complicat de enunţat, şi nici nu arată aşa de drăguţ ca enunţul originar referitor la arii egale, dar constituie în mod incontestabil odrasla primeia.

Să considerăm un sistem cu un număr mare de particule, cum ar fi Jupiter, Saturn, Soarele şi o grămadă de stele, toate interacţionând reciproc, pe care să îl privim de foarte departe, în proiecţie pe un plan perpendicular pe direcţia de observare (fig. 12). Particulele se mişcă în diverse direcţii. Să ne alegem un punct arbitrar în raport cu care să calculăm ariile măturate de

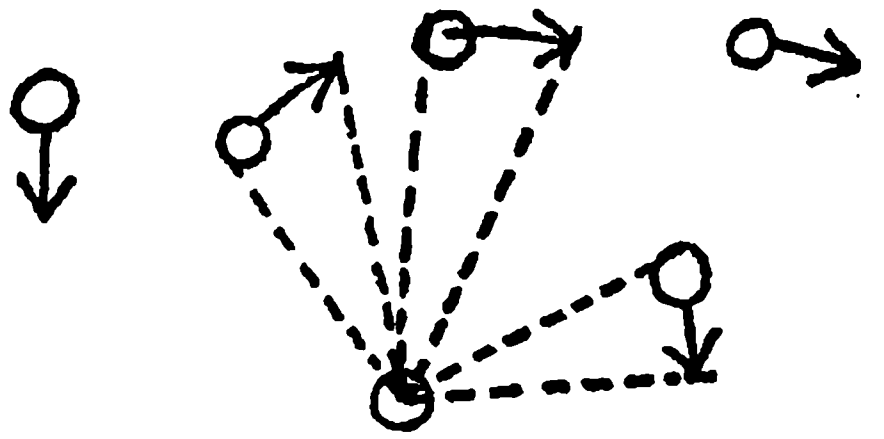


Figura 12

razele vectoare ale tuturor particulelor. Ariile descrise de particulele cu masă mai mare au o pondere mai importantă în cadrul rezultatului: dacă o particulă este de două ori mai grea decât alta, aria măturată de ea contează dublu faţă de cealaltă. Adunăm toate ariile astfel ponderate, iar suma obţinută nu variază în timp. Această mărime se numeşte moment cinetic, iar legea se cheamă Teorema Conservării Momentului Cinetic. Cuvântul conservare este sinonim cu constanţă.

Una din consecinţele acestei legi se prezintă în felul următor. Să ne imaginăm o mulţime de stele colapsând gravitaţional pentru a forma o nebuloasă sau o galaxie. La început ele sunt foarte îndepărtate unele de altele, vectorii lor de poziţie faţă de centru fiind foarte lungi şi nepermiţând generarea unor arii cu valori mari. Pe măsură ce se apropie între ele, distanţele faţă de centru se scurtează, iar când se strâng foarte mult, razele vectoare devin foarte mici. Atunci, pentru a da naştere aceleiaşi arii în unitatea de timp, ele se rotesc şi se învârtejesc tot mai repede, ceea ce ne permite să înţelegem în linii mari, din punct de vedere calitativ, forma nebuloaselor spiralate. La fel putem interpreta şi modul în care un patinator execută o piruetă. La început stă cu braţele depărtate, mişcându-se încet, iar pe măsură ce îşi strânge mâinile, se mişcă tot mai reprede. Atunci când braţele sunt întinse, avem o anumită cantitate de arie pe unitatea de timp; când sunt adunate, patinatorul trebuie să se rotească mai repede pentru a da naştere aceleiaşi cantităţi de moment cinetic. Însă eu nu am demonstrat acest lucru pentru patinator: patinatorul foloseşte forţa muşchilor, pe când gravitaţia este un alt fel de forţă. Dar faptul *este* adevărat pentru patinator.

În acest moment avem o problemă. Se întâmplă adesea ca dintr-un anumit domeniu al fizicii, precum Legea Atracţiei Universale, să putem deduce un principiu care se dovedeşte a fi cu mult mai valid decât simpla lui demonstraţie. În matematică aşa ceva nu se întâmplă; teoremele nu apar acolo unde nu le e locul. Cu alte cuvinte, dacă ar fi să afirmăm că pentru gravitaţie postulatul fizicii îl constituie ariile egale, am putea deduce de aici

conservarea momentului cinetic; dar numai pentru gravitaţie. Însă experimental se constată că această lege este mult mai cuprinzătoare. Ca să poată ajunge la legea generală de conservare a momentului cinetic, Newton a introdus postulate suplimentare. Însă aceste legi newtoniene sunt incorecte. În cazul particulelor elementare, ele constituie o mare pacaleală: acolo nu se poate vorbi de forţe, traiectorii, şi aşa mai departe. Şi totuşi, analogul acestora, corespondentul exact al principiului referitor la arii şi la conservarea momentului cinetic, este adevărat. El este valabil pentru mişcarea atomică din cadrul mecanicii cuantice şi, atât cât suntem noi capabili să spunem în ziua de astăzi, el se verifică totdeauna. Este vorba aici de principii cuprinzătoare, care depăşesc frontierele diferitelor legi, iar dacă luăm prea în serios demonstrarea lor, pe considerentul că ceva este valabil dacă şi numai dacă altceva este valabil, riscăm să nu putem înţelege interconexiunile diferitelor ramuri ale fizicii. Într-o bună zi, când fizica va fi completă şi vom şti toate legile, vom fi în stare să pornim de la anumite axiome, iar cineva va imagina, fără doar şi poate, un mod specific de a demonstra orice altceva. Dar atâta vreme cât nu cunoaştem toate legile, putem face uz de unele din ele pentru a avansa legi ce se extind dincolo de demonstraţii. Pentru a înţelege fizica, trebuie să păstrăm tot timpul măsura şi să avem mereu în vedere toate diversele enunţuri şi interconexiuni, căci adesea legile se extind dincolo de domeniul în care au fost demonstrate. Doar atunci când vom cunoaşte toate legile acest lucru nu îşi va mai justifica utilitatea.

Un alt fapt de interes în privinţa relaţiei dintre matematică şi fizică, foarte ciudat, este acela că pe baza unor argumente matematice, se poate arăta că este posibil de pornit din multe locuri aparent diferite, şi de ajuns totuşi în acelaşi punct. El este cât se poate de limpede: dacă avem nişte axiome, putem folosi în locul lor unele dintre teoreme. Însă legile fizicii sunt efectiv atât de delicat construite, încât diferitele enunţuri echivalente ale lor au caractere deosebite din punct de vedere calitativ, ceea ce le face foarte interesante. Pentru a ilustra aceasta, voi enunţa Legea Atracţiei Universale în trei moduri diferite, toate absolut echivalente, dar care sună total diferit.

Primul enunţ este acela că există forţe între corpuri potrivit ecuaţiei pe care v-am menţionat-o mai înainte.

$$F = G \frac{m m'}{r^2}$$

Fiecare corp, sub acțiunea forței, accelerează, își modifică mișcarea, cu o anumită cantitate în unitatea de timp. Acesta este modul obișnuit de a enunța legea, pe care îl voi numi Legea lui Newton. Acest enunț afirmă că forța depinde de ceva care se găsește la o distanță finită, motiv pentru care noi spunem că el are un caracter nelocal. Forța exercitată asupra unuia din corpuri depinde de distanța la care se află celălalt.

S-ar putea ca ideea de acțiune de la distanță să nu vă atragă. Cum ar putea acel obiect să știe ce se întâmplă dincolo? Așa încât există un alt mod de a enunța legile, foarte ciudat, numit teoria câmpului. Este greu de explicat, dar aș dori să vă ofer, în mare, o idee despre ce vrea să zică. Este vorba de ceva complet diferit. Există un număr asociat fiecărui punct din spațiu (e clar că un număr și nu un mecanism: asta-i problema cu fizicienii, nu se lasă până când nu matematizează), a cărui valoare se schimbă de la punct la punct. Dacă se plasează un corp într-un punct din spațiu, forța care se exercită asupra lui este orientată pe direcția pe care acel număr se modifică cel mai repede. (Am să precizez numele lui tehnic: se chemă potențial; forța este orientată pe direcția pe care potențialul variază cel mai rapid.) Mai mult, forța este proporțională cu cât de repede se schimbă acesta atunci când ne deplasăm pe acea direcție. Aceasta este o parte a enunțului, dar nu este suficientă, pentru că trebuie să vă precizez cum se determină modul în care variază potențialul. V-aș putea spune că potențialul depinde invers proporțional de distanță, dar asta ar însemna să ne întoarcem iar la ideea de acțiune de la distanță. Putem enunța într-o altă manieră legea, afirmând că nu este nevoie să știm decât ce se întâmplă în interiorul unei mici sfere, și nicăieri altundeva. Dacă vrem să aflăm care este potențialul în centrul sferei, trebuie doar să precizăm cât este el pe suprafața acesteia, atunci când sfera este făcută oricât de mică. Nu avem nevoie să privim în exteriorul sferei; tot ce trebuie să facem este să spunem cum stau lucrurile în punctele din imediata apropiere, și câtă masă este cuprinsă în sferă. Regula de calcul este următoarea: potențialul în punctul din centru este egal cu valoarea medie a potențialului de pe suprafața sferei, minus aceeași constantă de mai înainte, G, înmulțită cu masa din interiorul sferei suficient de mici, și împărțită la diametrul acesteia (raza ei am notat-o cu a).

$$\text{Potențialul în centru} = \text{Potențialul mediu pe sferă} - \frac{G}{2a} \cdot (\text{masa din interior})$$

Se observă că această lege diferă de prima prin faptul că ne spune ce se întâmplă într-un punct din spațiu, prin prisma a ceea ce se întâmplă în

imediata lui vecinătate. Legea lui Newton ne spune ce se întâmplă la un moment dat, prin prisma a ceea ce se întâmplă la alt moment. Ea ne oferă posibilitatea de a calcula lucrurile de la o clipă la alta, însă din punct de vedere spaţial sare dintr-un loc în altul. Al doilea enunţ este local şi în spaţiu, nu numai în timp, deoarece depinde doar de ceea ce se găseşte într-o vecinătate, dar amândouă sunt absolut echivalente din punct de vedere matematic.

Mai există şi o a treia manieră de a enunţa legea, complet diferită ca filosofie şi ca noţiuni calitative implicate. Aţi văzut că dacă nu vă atrage ideea de acţiune de la distanţă, lucrurile se pot rezolva. Acum vreau să vă prezint un enunţ care, din punct de vedere filosofic, reprezintă exact contrariul. În cadrul acestuia nu este vorba deloc despre cum evoluează lucrurile dintr-un loc în altul; aici totul este exprimat printr-o afirmaţie cu caracter integrator, după cum urmează. Atunci când avem un număr de particule şi vrem să ştim cum se mişcă una din ele dintr-un loc în altul, o facem inventând o posibilă mişcare, care să necesite un anumit interval de timp corespunzător (fig. 13).

Să zicem că particula vrea să se deplaseze din X în Y într-o oră, şi că vreţi să ştiţi pe ce drum trebuie să meargă. Ceea ce aveţi de făcut este să imaginaţi diferite curbe, şi de-a lungul fiecăreia să calculaţi o anumită mărime. (Nu ţin morţiş să vă spun despre ce mărime anume este vorba, însă pentru cei care au auzit de aceste noţiuni, mărimea se chemă valoarea medie a diferenţei dintre energia cinetică şi energia potenţială.) Pentru fiecare drum considerat, se obţine prin calcul o altă valoare a acestei mărimi. Există un drum din toate, pentru care valoarea aceasta este însă cea mai mică, iar acesta este cel pe care îl urmează particula în realitate! În acest moment, noi descriem mişcarea efectivă, elipsa, afirmând ceva despre întreaga curbă. Am renunţat la ideea de cauzalitate, aceea că particula resimte forţa exterioară şi că se mişcă potrivit acesteia. În locul ei avem acum ideea că particula, în cine ştie ce mod măiastru, adulmecă toate traiectoriile, toate posibilităţile, şi hotărăşte pe care din ele să o aleagă (pe cea pentru care mărimea noastră are valoare minimă).

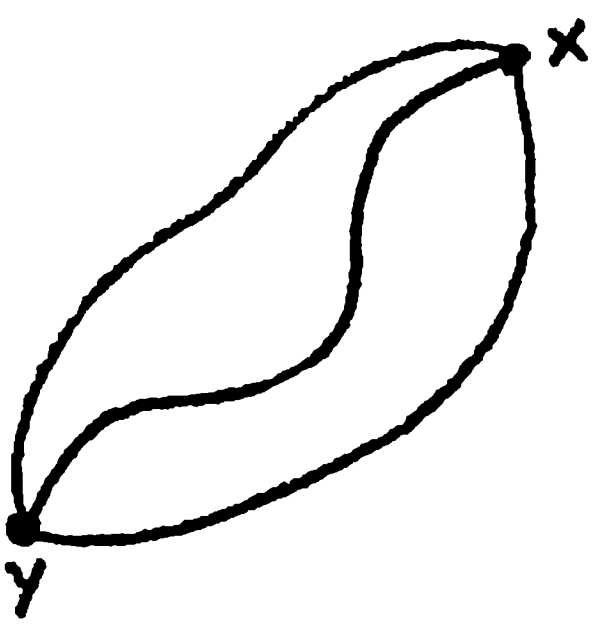


Figura 13

Acesta este un exemplu al gamei largi de moduri frumoase în care se poate descrie natura. Atunci când lumea spune că natura trebuie să aibă cauzalitate, putem folosi Legea lui Newton; atunci când afirmă că natura

trebuie descrisă în termeni ai unui principiu de minim, procedăm ca atare; sau dacă insistă că natura trebuie să prezinte un câmp local, în regulă, se rezolvă. Întrebarea este: care anume este varianta adevărată? Dacă aceste alternative nu sunt absolut echivalente, dacă pentru unele din ele există consecințe diferite de ale altora, atunci tot ce avem de făcut este să efectuăm experimente prin intermediul cărora să aflăm efectiv pe care anume a ales-o natura. Lumea poate să vină şi să dezbată din punct de vedere filosofic faptul că le place o variantă mai mult decât alta, dar din experiența îndelungată am aflat că orice intuiție filosofică în privința intențiilor naturii este sortită eşecului. Nu putem decât să determinăm toate posibilitățile şi să încercăm toate alternativele. Însă în cazul particular la care mă refer aici, teoriile *sunt* absolut echivalente. Din punct de vedere matematic, toate trei formulările, Legea lui Newton, metoda câmpului local şi principiul de minim, dau exact aceleaşi consecințe. Ce ne facem atunci? În toate cărțile pe care le veți citi, veți găsi că, din punct de vedere ştiințific, nu ne putem decide asupra uneia sau alteia. Este adevărat. Din punct de vedere ştiințific ele sunt echivalente. Nu putem lua o hotărâre, căci, din moment ce toate consecințele sunt aceleaşi, nu există nici o cale experimentală prin care să le distingem. Dar din punct de vedere psihologic, ele sunt foarte diferite în două privințe. Mai întâi, filosofic vorbind, ele îți plac sau nu; iar antrenamentul este singurul mod de a combate această boală. În al doilea rând, ele sunt diferite pentru că sunt total neechivalente atunci când vine vorba de a găsi noi legi. Atâta timp cât fizica este incompletă, iar noi încercăm să înțelegem celelalte legi, diferitele formulări posibile pot oferi indicii cu privire la ce s-ar întâmpla în alte circumstanțe. În acest caz, din punct de vedere psihologic ele nu mai sunt echivalente, sugerându-ne ipoteze referitoare la modul în care ar arăta legile în situații mai generale.

Ca un exemplu, Einstein a realizat faptul că semnalele *electrice* nu se pot propaga cu viteze mai mari decât cea a luminii. El a bănuit că acest fapt constituie un principiu general. (Este vorba de acelaşi joc de-a ghicitul ca şi în cazul în care se consideră momentul cinetic, iar demonstrația făcută pentru un domeniu este extinsă la restul fenomenelor din Univers.) Einstein a presupus că faptul este adevărat pentru orice, în particular şi pentru gravitație. Dacă semnalele nu se pot deplasa mai repede decât lumina, atunci se dovedeşte că metoda de a descrie forțele din perspectivă instantanee este foarte nefericită. Aşa încât, în cadrul generalizării gravitației introdusă de Einstein, metoda lui Newton de a descrie fizica este iremediabil neadecvată şi extrem

de complicată, pe când teoria câmpului şi principiul de minim sunt simple şi clare. Între acestea două încă nu ne-am decis.

De fapt, se dovedeşte că în cadrul mecanicii cuantice, nici una din cele două nu este corectă exact în maniera în care au fost enunțate, dar se găseşte că existența unui principiu de minim constituie o consecință a faptului că la scară mică particulele ascultă de legile mecanicii cuantice. Cea mai bună lege, aşa cum este ea privită în prezent, reprezintă în fapt o combinație a celor două, în care se face uz de principii de minim, plus legi locale. Actualmente, credem că legile fizicii trebuie să prezinte şi caracter local şi principii de minim, dar nu suntem siguri. Atunci când dispui de o structură care este doar parțial precisă, şi se poate prăbuşi ceva, este posibil ca numai ceva să eşueze, iar restul să rămână valabil, necesitând modificări minore. Însă dacă structura este descrisă de vreun alt set de axiome, este posibil ca acestea toate să se sprijine pe cea falsă şi să se prăbuşească în întregime. Nu putem şti dinainte, fără ceva intuiție, care este maniera cea mai bună de a descrie structura respectivă, astfel încât să dăm peste noua situație. Trebuie să avem mereu în minte toate modurile de a privi un lucru; aşa că fizicienii fac matematică babiloniană, şi nu pun atât de mare preț pe raționamentele riguroase ce pornesc de la axiome fixate.

Una din trăsăturile uimitoare ale naturii o constituie varietatea de scheme interpretaționale posibile. Aceasta se datorează tocmai faptului că legile sunt exact aşa: deosebite şi delicate. De exemplu, ceea ce permite legii să devină locală este tocmai inversa proporționalitate cu pătratul distanței; în cazul unei inverse proporționalități cu cubul distanței, lucrul nu ar mai fi posibil. La celălalt capăt al problemei, cel care permite maniera de descriere a legilor prin intermediul unui principiu de minim, este faptul că forța depinde de rata de variație a vitezei. Dacă, de exemplu, forța ar fi depins în schimb de rata de variație a poziției, legea nu ar mai fi putut fi descrisă astfel. Dacă modifici legile în mod substanțial, descoperi că le mai poți scrie doar în puține feluri. Totdeauna mi s-a părut ceva misterios şi nu am înțeles motivul pentru care legile corecte ale fizicii par a fi exprimabile într-o varietate atât de mare de moduri.

Aş dori să mai spun câteva cuvinte despre nişte relații mai generale între matematică şi fizică. Matematicienii se ocupă doar de structurile

raționamentului, şi nu sunt propriu-zis interesați de ce reprezintă ele. Nici nu au nevoie să ştie despre ce este vorba, sau, după cum singuri afirmă, dacă ceea ce spun ei este real. Să vă explic. Enunțați nişte axiome: aşa, şi-aşa, şi pe dincolo. Şi pe urmă? Firul logicii poate fi urmărit şi fără a cunoaşte ce vrea să zică acel „aşa şi pe dincolo". Dacă enunțurile axiomelor sunt formulate cu grijă şi suficient de complet, cel care face raționamentul nu trebuie neapărat să cunoască înțelesul cuvintelor pentru a deduce noi concluzii în acelaşi limbaj. Dacă se foloseşte cuvântul triunghi într-una din axiome, în cadrul concluziilor va exista un enunț referitor la triunghiuri, deşi cel care efectuează raționamentul s-ar putea să nu ştie ce este acela un triunghi. Însă eu pot să iau să parcurg raționamentul lui şi să spun „triunghiul este o chestie din alea cu care lucrezi tu, care are trei laturi şi care este aşa şi pe dincolo"; şi astfel voi dispune de noile fapte la care el a ajuns. Cu alte cuvinte, matematicienii pregătesc raționamente abstracte numai bune pentru a fi folosite atunci când posezi un set de axiome despre lumea reală. Însă fizicianul conferă înțeles tuturor spuselor sale. Acesta este un lucru foarte important, pe care o grămadă de oameni ce vin în fizică dinspre matematică, nu îl apreciază. Fizica nu este matematică, iar matematica nu este fizică. Una o ajută pe cealaltă. Dar în fizică trebuie să dispui de o înțelegere a conexiunii dintre cuvinte şi lumea reală. Este nevoie ca, în final, tot ceea ce ai conceput să traduci în limbaj obişnuit, în termeni lumeşti, în blocurile de cupru şi sticlă cu care va urma să experimentezi. Doar astfel vei putea afla dacă ceea ce prevezi tu drept consecințe este adevărat. Pentru matematicieni, această chestiune nu reprezintă o problemă.

Desigur, este evident că raționamentele matematice care au fost elaborate sunt foarte puternice şi sunt de mare ajutor pentru fizicieni. Pe de altă parte, uneori se întâmplă ca raționamentele fizicienilor să fie folositoare matematicienilor.

Matematicienilor le place să-şi construiască raționamentul cât mai general posibil. Dacă le spui „vreau să vorbim despre spațiul obişnuit, cu trei dimensiuni." ei îți răspund „iată teoremele pentru un spațiu cu n dimensiuni." „Dar pe mine mă interesează cazul tridimensional." „Bine, fie $n = 3$!" Astfel, se dovedeşte că multe din teoremele lor complicate arată mult mai simplu pe un caz particular. Fizicianul este întotdeauna interesat de cazul particular; nu este niciodată interesat de cazul general. El se referă la ceva concret; nu vorbeşte la modul abstract, despre nimic în particular. El vrea să discute Legea Atracției Universale în trei dimensiuni; nu îl interesează niciodată cazul unei forțe arbitrare în n dimensiuni. Deci, este necesar un

anumit grad de reducționism, căci matematicienii au pregătit aceste lucruri pentru o gamă largă de probleme. Acest fapt este foarte folositor, având în vedere că, mai devreme sau mai târziu, se dovedeşte că sărmanul fizician se va întoarce şi va întreba: „Fii drăguț, ziceai ceva de patru dimensiuni…"

Atunci când ştii efectiv despre ce vorbeşti, că anumite simboluri reprezintă forțe, că altele reprezintă mase, inerție, şi aşa mai departe, poți face uz din plin de bunul-simț, de sentimentul unei lumi palpabile. Ai văzut multe lucruri de-a lungul timpului şi ți-ai făcut cât de cât o idee despre cum se va petrece fenomenul. Însă sărmanul matematician traduce totul în ecuații, şi cum simbolurile nu înseamnă nimic pentru el, nu are alt ghid decât rigoarea matematică absolută şi grija în argumentație. Fizicianul, care ştie mai mult sau mai puțin cum va arăta rezultatul, poate într-un fel să mai şi ghicească într-o oarecare măsură, avansând astfel mai rapid. Rigoarea perfectă a matematicianului nu este de foarte mare ajutor în fizică. Însă matematicienii nu trebuie criticați pentru asta. Doar pentru că ceva este folositor în fizică, nu înseamnă ca ei să se conformeze. Ei îşi fac treaba lor. Dacă vrei altceva, atunci fă-ți singur.

Următoarea întrebare este dacă, atunci când încercăm să ghicim noi legi, este bine să ne folosim de sentimentul unei lumi palpabile şi de principii filosofice – „nu-mi place principiul de minim", sau „îmi place principiul de minim"; „nu-mi place ideea de acțiune de la distanță", sau „îmi place ideea de acțiune de la distanță". În ce măsură sunt de ajutor modelele? Este interesant faptul că foarte adesea modelele ajută, iar majoritatea profesorilor de fizică încearcă să predea maniera în care trebuie folosite modelele pentru a căpăta o percepție foarte corectă asupra felului în care se petrec lucrurile. Dar se dovedeşte că cele mai mari descoperiri se detaşează întotdeauna de modele înspre abstract, şi că în cadrul lor modelele nu servesc la nimic. Descoperirea electrodinamicii de către Maxwell* a fost făcută la început pe baza unei sumedenii de rotițe şi pinioane imaginare în spațiu. Însă în momentul în care se renunță la toate aceste angrenaje şi lucruri în spațiu, totul devine OK. Dirac** a descoperit legile corecte ale mecanicii cuantice

---

* James Clerk Maxwell, 1831-1879. Primul profesor de fizică experimentală de la Cambridge.

** Paul Dirac, fizician britanic, laureat al Premiului Nobel pentru fizică în 1933, împreună cu Schrödinger.

relativiste pur şi simplu ghicind ecuaţia. Metoda de a ghici ecuaţia pare a fi o metodă cât se poate de eficientă de a găsi noi legi. Acest fapt arată încă o dată că matematica reprezintă o cale profundă de a exprima natura, şi că orice încercare de a exprima natura în principii filosofice, ori în senzaţii înrădăcinate ale unei lumi palpabile, constituie o cale neeficientă.

Nu-mi dă niciodată pace faptul că potrivit legilor, aşa cum le înţelegem noi acum, pentru a stabili ce se întâmplă într-o regiune oricât de mică din spaţiu şi într-o perioadă oricât de mică de timp, unei maşini de calcul îi trebuie un număr infinit de operaţii logice. Cum s-ar putea întâmpla atâtea în ceva aşa de mic? De ce să fie necesară o cantitate infinită de logică pentru a stabili ce are de gând o porţiune infimă de spaţiu/timp? Aşa încât am avansat adeseori ipoteza că, în ultimă instanţă, fizica nu va reclama un enunţ matematic, că, în final, mecanismul se va dezvălui, şi că legile se vor dovedi a fi simple, asemenea şahului, cu toată acea complexitate aparentă proprie lui. Însă această speculaţie este de aceeaşi factură ca şi celelalte – „îmi place", „nu-mi place" – şi nu e bine să ai prejudecăţi în astfel de privinţe.

Pentru a rezuma, aş folosi cuvintele lui Jeans, care a spus: „Se pare că Marele Arhitect este matematician." Celor care nu cunosc matematică, le este greu să surprindă frumuseţea, profunda frumuseţe a naturii. C. P. Snow vorbea despre două culturi. Sincer, cred că aceste două culturi îi despart pe cei care au trăit de cei care nu au trăit experienţa aceasta, de a înţelege suficient de bine matematica pentru a aprecia măcar o dată la justa ei valoare natura.

Este păcat că s-a întâmplat să fie vorba tocmai de matematică, şi că tocmai matematica este grea pentru unii oamenii. Se spune – nu ştiu dacă este adevărat – că atunci când un rege din vremea aceea a încercat să înveţe de la Euclid geometria, el s-ar fi plâns că este grea. „Nu există o cale special pentru regi către geometrie," i-ar fi răspuns acesta din urmă. Şi, în genere, nu există căi regale. Fizicienii nu pot face conversii către nici un alt limbaj. Dacă vrei să înveţi despre natură, să apreciezi natura, este necesar să înţelegi limba în care ea vorbeşte. Ea îşi oferă informaţiile doar sub o singură formă; nu putem fi atât de trufaşi încât să-i cerem să se schimbe pentru ca noi să-i acordăm atenţie.

Oricâte explicații pertinente i-ați da celui ce nu aude, ele nu îi vor putea comunica ce înseamnă cu adevărat să trăiești experiența muzicii. Tot astfel, toate explicațiile inteligente de pe lumea asta, nu vor putea transmite o înțelegere a naturii către cei ce aparțin „celeilalte culturi". Filosofii ar putea încerca să vă învețe, vorbindu-vă în termeni calitativi despre natură. Eu încerc să o descriu. Dar descrierea este imposibil de tălmăcit. Poate din cauză că orizontul anumitor oameni este astfel limitat încât să-și închipuie că ființa umană este centrul Universului.

3 MARILE PRINCIPII DE CONSERVARE

Atunci când se învaţă despre legile fizicii, se descoperă faptul că există un număr mare de legi complicate şi amănunţite – legile gravitaţiei, ale electricităţii şi magnetismului, ale interacţiunilor nucleare, şi aşa mai departe – dar că varietatea aceasta de legi detaliate este străbătută de la un capăt la altul de mari principii generale, de care toate par a asculta. Exemple de astfel de principii sunt: principiile de conservare, anumite calităţi ale simetriei, forma generală a ecuaţiilor mecanicii cuantice şi aspectul discutat data trecută, acela că – din nefericire, sau din fericire, cum vreţi s-o luaţi – toate legile sunt matematice. În această prelegere vreau să vorbesc despre principiile de conservare.

Fizicianul foloseşte cuvinte obişnuite într-o manieră ciudată. Pentru el, o lege de conservare înseamnă că există o cantitate pe care o calculează la un anumit moment, iar apoi, pe măsură ce natura suferă o multitudine de schimbări, dacă mai calculează mărimea respectivă la momente de timp ulterioare, valoarea ei rămâne aceeaşi – numărul nu se schimbă. Un exemplu este conservarea energiei: avem o mărime pe care o putem calcula potrivit anumitor reguli şi al cărei rezultat iese mereu la fel, orice-ar fi.

Acuma, vă daţi seama că aşa ceva se prea poate să ne fie util. Să presupunem că fizica, sau mai curând natura, se consideră analoagă unui imens joc de şah, cu milioane de piese, şi că noi încercăm să descoperim legile după care sunt mutate piesele. Marii zei care joacă acest şah îl joacă foarte rapid, fapt pentru care el este greu de văzut şi dificil de urmărit. Totuşi, întrezărim unele reguli, şi mai există anumite reguli de care ne putem prinde fără să fie nevoie să urmărim fiecare mutare. De exemplu, să presupunem că pe tablă este doar un nebun, un nebun de roşu. Din moment ce nebunul se deplasează pe diagonală, şi ca atare nu îşi schimbă culoarea câmpului pe care

stă, dacă privim la un moment dat în timpul jocului, iar mai târziu ne mai uităm o dată pe tablă, ne putem aştepta să existe în continuare un nebun de roşu, poate în altă parte, dar pe un câmp de aceeaşi culoare. În aşa ceva constă natura unei legi de conservare. Nu avem nevoie să urmărim dedesubturile pentru a şti măcar atâta despre joc.

Este adevărat că în şah această lege particulară nu este neapărat perfect validă. Dacă ne-am întors privirea de la joc suficient de mult timp, poate că nebunul a fost capturat; poate că un pion a atacat dama, iar zeul a hotărât că, decât să ia cu regina, este mai bine să ia cu nebunul acel pion ce se întâmpla să stea pe o pătrăţică roşie. Din nefericire, s-ar putea dovedi la fel de bine şi că unele din legile de conservare pe care le observăm noi astăzi nu sunt absolut exacte, însă eu vă voi vorbi despre ele aşa cum le vedem noi în momentul actual.

Am afirmat că noi folosim cuvinte obişnuite într-o manieră tehnică, iar un alt cuvânt din titlul acestei prelegeri este „marile“: „Marile Principii de Conservare“. Acesta nu este un cuvânt tehnic: el a fost folosit doar pentru a face ca titlul să sune mai teatral; aş fi putut tot atât de bine să o intitulez „Legile de Conservare“. Există o mână de legi de conservare care nu ţin; ele sunt doar aproximativ corecte, dar sunt uneori utile, şi pe acestea le-aş putea numi „micile“ principii de conservare. Voi menţiona ceva mai încolo una sau două din aceste legi care nu ţin, dar cele principale, despre care intenţionez să discut sunt, atât cât ştim noi în clipa de faţă, absolut exacte.

Voi începe cu cea mai uşor de înţeles, şi anume conservarea sarcinii electrice. Există un număr, sarcina electrică totală din lume, care, indiferent ce s-ar întâmpla, nu se schimbă. Dacă o pierzi dintr-un loc, o regăseşti în altul. Conservarea se referă la suma totală a sarcinilor electrice. Acest fapt a fost descoperit experimental de către Faraday.* Experimentul consta în a pătrunde în interiorul unei mari sfere de metal, în afara căreia era montat un galvanometru foarte sensibil, pentru a urmări sarcina de pe sferă. O cantitate mică de sarcină electrică ar fi dat naştere unui efect remarcabil. În interiorul sferei, Faraday a construit tot felul de echipamente electrice ciudate. El a produs sarcini electrice prin frecarea unei baghete de sticlă cu o blăniţă de pisică, şi a montat mari maşini electrostatice, astfel încât locul arăta precum acele laboratoare din filmele de groază. Dar, pe parcursul tuturor acestor

* Michael Faraday, 1791-1867, fizician englez.

experimente, la suprafaţa sferei nu s-a evidenţiat nici o sarcină electrică: nu se produsese nici o sarcină netă. Chiar dacă bagheta de sticlă se va fi electrizat pozitiv prin frecare cu blana de pisică, aceasta din urmă va fi căpătat o cantitate egală de sarcină negativă, sarcina totală rămânând zero. Altfel, evidenţierea unei sarcini oarecari în interior, ar fi produs un efect asupra galvanometrului din exterior. Deci sarcina totală se conservă.

Acest lucru este uşor de înţeles, putând fi explicat prin intermediul unui model foarte simplu, câtuşi de puţin matematic. Să ne închipuim că lumea este făcută doar din două tipuri de particule, electroni şi protoni – au fost vremuri când chiar a părut că vom scăpa aşa de uşor – şi să presupunem că electronii poartă o sarcină negativă, iar protonii una pozitivă şi că-i putem separa. Luăm o cantitate de materie şi îi adăugăm sau îi înlăturăm un electron; dar dacă presupunem că electronii sunt veşnici şi că nu dispar sau nu se dezintegrează niciodată – aceasta constituie o afirmaţie simplă, nici măcar matematică – atunci numărul total de protoni minus numărul total de electroni nu se va schimba. În fapt, în cadrul acestui model particular, nici numărul total de protoni şi nici numărul total de electroni nu se vor modifica. Însă acum noi ne concentrăm atenţia asupra sarcinii electrice. Contribuţia protonilor la aceasta este pozitivă, iar contribuţia electronilor este negativă, iar dacă aceste obiecte nu se creează şi nu se distrug separat niciodată, înseamnă că sarcina totală se conservă. Doresc ca, pe măsură ce înaintez în expunere, să întocmesc o listă cu proprietăţile care îşi conservă valoarea, şi voi începe cu sarcina electrică (fig. 14). La rubrica dacă se conservă, voi trece „da“.

	Sarcină	Nr. barionic	Stranietate	Energie	Moment cinetic
Se conservă (local)	Da	Da	Aproape	Da	Da
Vine în trenşe	Da	Da	Da	Nu	Da
Sursă a unui câmp	Da	?	?	Da	

NB – Acesta este tabelul complet pe care prof. Feynman l-a întocmit pe parcursul prelegerii.

Figura 14

Interpretarea teoretică este foarte simplă, dar ulterior s-a descoperit că electronii şi protonii nu sunt permanenţi; de exemplu, o particulă numită

neutron se poate dezintegra într-un proton şi un electron – plus încă ceva, la care vom ajunge mai târziu. Însă se dovedeşte că neutronul este neutru din punct de vedere electric. Deci, chiar dacă nici protonii, nici electronii, nu sunt permanenți, în sensul că pot fi creați dintr-un neutron, conservarea sarcinii electrice încă se verifică: la început am avut zero, iar pe urmă am avut plus unu şi minus unu, care adunate dau în continuare sarcină zero.

Un exemplu de situație similară cu aceasta este cea în care, în afară de proton, mai există o altă particulă care este tot pozitivă. Ea se numeşte pozitron şi este un fel de imagine în oglindă a electronului. În multe privințe este asemenea electronului, cu deosebirea că are sarcină de semn opus. Mai important încă, ea este ceea ce se numeşte o antiparticulă, întrucât, dacă se întâlneşte cu un electron, se anihilează reciproc şi se dematerializează, dând naştere doar unei lumini. Deci electronii nu sunt permanenți nici măcar de unii singuri. Un electron plus un pozitron vor da pur şi simplu lumină. De fapt, „lumina“ nu este vizibilă cu ochiul liber: este vorba de raze gamma; însă pentru un fizician reprezintă acelaşi lucru, ele nediferind decât prin lungimea de undă. Prin urmare, o particulă şi antiparticula ei se pot anihila. Lumina nu are sarcină electrică, însă noi am înlăturat o sarcină pozitivă şi una negativă, deci nu am modificat sarcina totală. Ca atare, teoria conservării sarcinii electrice este un pic mai complicată, însă la fel de puternic nematematică. Pur şi simplu se adună numărul de pozitroni şi protoni, se scade numărul de electroni… şi mai trebuie luate în considerare şi alte particule, cum ar fi antiprotonii, care au contribuție negativă, sau mezonii pi-plus, care sunt pozitivi. În fapt, fiecare particulă fundamentală din natură prezintă o sarcină electrică (eventual zero). Tot ce avem de făcut este să adunăm numărul lor total şi, indiferent de ce s-ar întâmpla în vreo reacție oarecare, cantitatea totală de sarcină electrică din membrul stâng trebuie să o echilibreze pe cea din membrul drept.

Acesta este un aspect al conservării sarcinii. Acum vine o întrebare interesantă. Este oare suficient doar să afirmăm că sarcina se conservă, sau trebuie să spunem mai mult? Dacă sarcina s-ar conserva din cauză că reprezintă o particulă reală care se mişcă de colo-colo, ea ar prezenta o proprietate cu totul deosebită. Cantitatea totală de sarcină dintr-o incintă poate rămâne constantă în două moduri. Se poate ca sarcina să se deplaseze dintr-un loc în altul în interiorul incintei. Dar o altă posibilitate ar fi ca ea să dispară dintr-un loc şi simultan să apară în altul, instantaneu, astfel încât sarcina totală să nu se schimbe nicicând. Această a doua posibilitate de conservare este de o altă natură decât prima, în care ceva trebuie să

călătorească prin spaţiu, din locul în care sarcina dispare până în punctul unde ea apare. Prima formă de conservare se numeşte conservarea locală a sarcinii, şi este mult mai detaliată decât simpla remarcă potrivit căreia sarcina totală nu se schimbă. Vedeţi aşadar că, dacă este adevărat că sarcina se conservă local, atunci noi ne îmbunătăţim legea. În fapt, chiar este adevărat. Din când în când am încercat să vă arăt posibilităţile de raţionare, de interconectare a ideilor, iar acum aş dori să vă descriu un argument, datorat în esenţă lui Einstein, care ne indică faptul că dacă ceva se conservă – şi aici el se aplică sarcinii electrice – atunci acel ceva se conservă local. Acest argument se sprijină pe un anumit lucru, acela că dacă doi inşi trec unul pe lângă celălalt în nişte nave cosmice, nu se poate determina, prin intermediul nici unui experiment, care din ei se află în mişcare şi care în repaus. Acesta se numeşte Principiul Relativităţii, şi ne spune că mişcarea rectilinie uniformă este relativă şi că, indiferent ce fenomen urmărim din oricare din cele două sisteme de referinţă, nu putem spune care din ele se află în repaus şi care se mişcă.

Să presupunem că avem două nave cosmice, A şi B (fig. 15). Voi adopta punctul de vedere potrivit căruia A trece prin dreptul lui B. Reţineţi că este doar o părere: puteţi privi lucrurile şi invers, şi veţi obţine acelaşi fenomen al naturii. Acum să presupunem că omul aflat în repaus vrea să argumenteze dacă a văzut sau nu o sarcină electrică dispărând la un capăt al navei sale şi apărând în acelaşi timp la celălalt capăt. Pentru a se asigura că este vorba de acelaşi moment, el nu poate sta într-un capăt al navei, căci ar vedea unul din fenomene înaintea celuilalt, din cauza timpului de propagare a luminii; aşa încât să presupunem că este foarte grijuliu şi se aşează exact în mijlocul navei. Mai avem încă un om făcând acelaşi gen de observaţie în cealaltă navă. Acuma, un fulger loveşte în punctul x şi generează acolo o

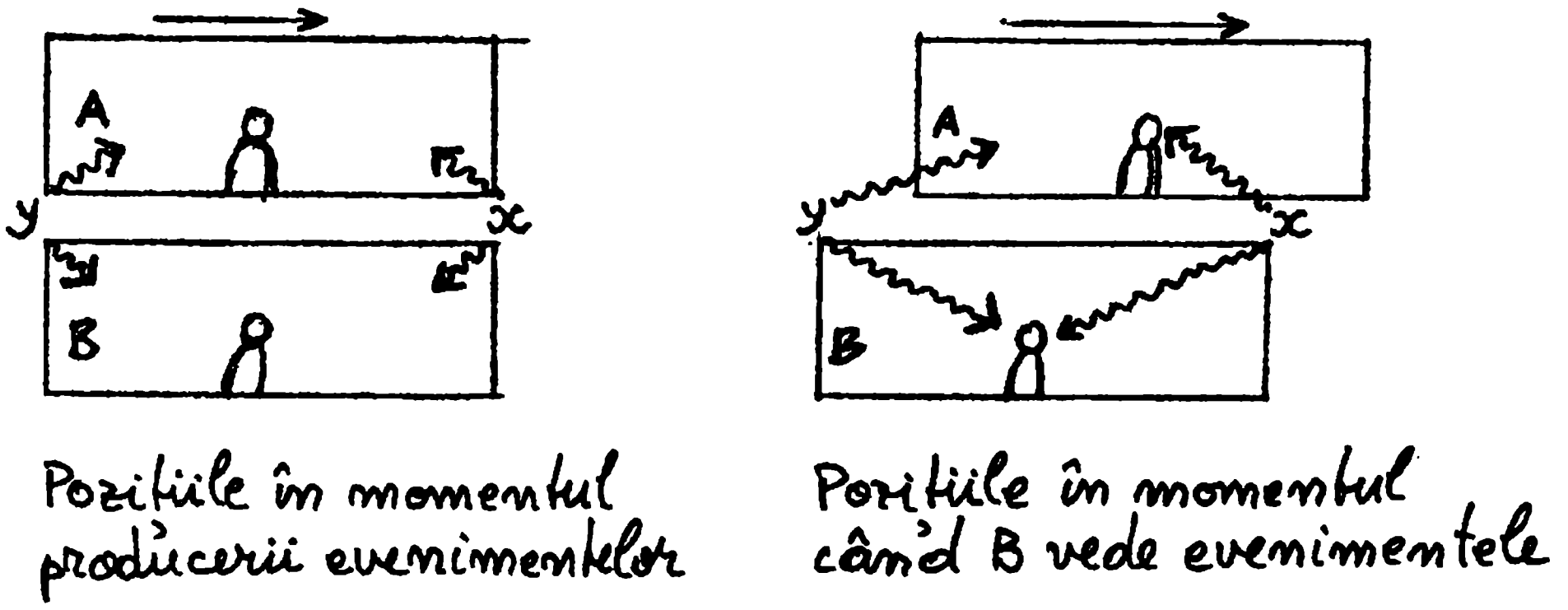


Figura 15

sarcină electrică, iar în aceeaşi clipă în punctul y, la celălalt capăt al navei, sarcina este anihilată, dispare. În aceeaşi clipă, atenţie, în perfectă concordanţă cu ideea noastră că sarcina se conservă. Pierdem un electron într-un loc şi câştigăm un altul altundeva, dar nu trece nimic de colo dincolo. Să presupunem că atunci când sarcina dispare se produce o scânteie, şi de asemenea atunci când ea se creează, astfel încât se poate vedea ce se întâmplă. B spune că ambele lucruri se petrec în acelaşi timp, întrucât dispariţia sarcinii în y îi parvine în acelaşi moment şi el ştie că se află exact la mijlocul navei. Aşa că B afirmă: „Da, atunci când a dispărut una, s-a creat cealaltă." Dar cum stau lucrurile pentru prietenul nostru din cealaltă navă? El spune: „Nu, te înşeli, amice. Am văzut crearea din x înaintea dispariţiei din y." Asta din cauză că el se mişcă înspre x, şi deci lumina din x va avea de parcurs un drum mai scurt decât cea din y, de care el se depărtează. El ar putea afirma: „Nu, întâi s-a creat sarcina în x şi abia apoi a dispărut sarcina în y, aşa încât, pentru o scurtă perioadă de timp dintre cele două momente, am avut o sarcină electrică. Aceasta contrazice legea conservării sarcinii." Însă primul ins replică: „Da, dar tu te mişcai." Iar el răspunde: „De unde ştii? Eu cred că tu te mişcai." Şi aşa mai departe. Dacă, prin nici un experiment, nu suntem în stare să sesizăm vreo diferenţă în legile fizicii, indiferent dacă ne aflăm în mişcare sau nu, atunci, în cazul în care conservarea sarcinii nu ar fi locală, numai un anumit gen de observatori ar putea-o vedea funcţionând corect, şi anume cei care s-ar afla în repaus, la modul absolut. Însă, potrivit Principiului Relativităţii al lui Einstein, aşa ceva este imposibil şi, ca atare, este imposibil să avem conservare nelocală de sarcină electrică. Caracterul local al conservării sarcinii este consonant cu teoria relativităţii, şi se dovedeşte că este adevărat pentru toate legile de conservare. Asta merită apreciat: dacă ceva se conservă, atunci se aplică acelaşi principiu.

Mai există un lucru interesant legat de sarcina electrică, un lucru foarte ciudat, pentru care în momentul de faţă nu avem nici o explicaţie concretă. El nu are nici o legătură cu legea conservării şi acţionează independent de aceasta. Sarcina electrică vine tot timpul în porţii. Atunci când avem o particulă încărcată, sarcina ei are o unitate, sau două unităţi, sau minus o unitate, sau minus două. Revenind la tabelul nostru, deşi nu are nimic de-a face cu conservarea, trebuie să notez faptul că lucrul care se conservă vine în porţii. Aceasta este ceva plăcut, căci face ca teoria conservării sarcinii să fie foarte uşor de înţeles: pur şi simplu este *ceva* ce putem număra şi care trece dintr-un loc în altul. În fine, din punct de vedere tehnic, se dovedeşte că sarcina totală a unui corp se poate determina uşor, deoarece are o

caracteristică importantă: ea constituie sursa câmpului electric şi a celui magnetic. Sarcina reprezintă o măsură a interacţiunii unui obiect încărcat, cu un câmp electric. Deci un alt punct pe care ar trebui să-l adăugăm la listă este faptul că sarcina constituie sursa unui câmp; cu alte cuvinte, electrizarea are legătură cu sarcina. Aşadar, mărimea fizică particulară care se conservă aici posedă alte două aspecte care nu sunt legate direct de conservare, dar care, în orice caz, sunt interesante. Unul este acela că vine în porţii, iar celălalt că reprezintă sursa unui câmp.

Există multe legi de conservare, şi vă voi oferi alte câteva exemple de legi de acelaşi gen ca cea a conservării sarcinii, în sensul că ele sunt doar o chestiune de numărare. Există o lege de conservare numită conservarea barionilor. Un neutron se poate transforma într-un proton. Dacă fiecare din ei contează drept o unitate, sau barion, atunci înseamnă că se păstrează numărul de barioni. Neutronul poartă o sarcină barionică de o unitate, sau reprezintă un barion, iar protonul reprezintă tot un barion – tot ce facem este să numărăm şi să folosim cuvinte pompoase! – aşa încât, la producerea reacţiei despre care vorbim, în care un neutron se dezintegrează într-un proton, un electron şi un antineutrin, numărul total de barioni nu se schimbă. Totuşi, există şi alte reacţii în natură. Un proton plus un alt proton pot produce o mare varietate de obiecte stranii, de exemplu un lambda, un proton şi un K plus. Lambda şi K plus constituie nume ale unor particule ciudate.

(uşor) $p + p \rightarrow \lambda + p + K^+$

Ştim că în reacţie intră doi barioni, dar vedem ieşind doar unul, deci este posibil ca fie lambda, fie K^+, să aibă un barion. Dacă mai apoi îl studiem pe lambda, găsim că, foarte greu, el se dezintegrează într-un proton şi un pi, iar pi, finalmente, se dezintegrează într-un electron şi altele de genul acesta.

(greu) $\lambda \rightarrow p + \pi$

Ce avem noi aici este o reapariţie a barionului în cadrul protonului, aşa încât noi credem că lambda are numărul barionic 1, iar K^+ are zero.

Aşadar, pe lista noastră cu legi de conservare (fig. 14) este trecută sarcina electrică, iar acum avem o situaţie similară în privinţa barionilor, cu o regulă specială specifică, potrivit căreia numărul barionic reprezintă numărul de protoni, plus numărul de neutroni, plus numărul de lamda-uri,

minus numărul de antiprotoni, minus numărul de antineutroni, şi aşa mai departe; este doar o propoziţie despre numărare. Numărul barionic se conservă, vine în porţii şi, nimeni nu ştie dar tuturor le place, prin analogie, să creadă că este sursa unui câmp.

Motivul pentru care alcătuim aceste tabele este acela că încercăm să surprindem legile interacţiunilor nucleare, iar acesta este un mod rapid de a ghici natura. Dacă sarcina este sursa unui câmp, iar barionii se comportă la fel ca sarcina în alte privinţe, atunci ar trebui ca şi ei să fie sursa unui câmp. Păcat că până acum nu prea pare să fie cazul; nu este imposibil, dar nu ştim destule pentru a putea fi siguri de aceasta.

Mai sunt una sau două astfel de propoziţii despre numărare, de pildă cea referitoare la numărul de leptoni şi aşa mai departe, însă ideea este aceeaşi ca în cazul barionilor. Există însă una uşor diferită. La aceste particule ciudate din natură întâlnim nişte rate de reacţie caracteristice, dintre care unele sunt foarte rapide şi uşoare, iar altele foarte lente şi grele. Termenii uşor şi greu nu sunt folosiţi aici într-un sens tehnic, ca referitori la realizarea efectivă a experimentului, ci cu privire la ratele de producere a reacţiilor respective în prezenţa particulelor date. Există o distincţie clară între cele două tipuri de reacţie pe care le-am menţionat mai sus, dezintegrarea unei perechi de protoni şi mult mai lenta dezintegrare a lui lambda. Se dovedeşte că dacă se iau în discuţie doar reacţiile rapide şi uşoare, mai există o lege de numărare, în cadrul căreia lamda primeşte valoarea minus 1, K plus ia valoarea plus 1, iar protonul este zero. Aceasta poartă numele de stranietate, sau sarcină hiperonică, şi se vădeşte că regula de conservare este corectă pentru orice reacţie uşoară, dar falsă pentru reacţiile grele. Ca urmare, în tabelul nostru (fig. 14) trebuie să adăugăm legea de conservare a stranietăţii, sau numărului hiperonic, care este aproape corectă. Acest lucru este foarte ciudat; pricepeţi acum de ce această mărime a fost numită stranietate. Este aproape adevărat că ea se conservă, şi perfect adevărat că vine în porţii. În încercarea de a înţelege interacţiunile puternice pe care le implică forţele nucleare, faptul că în cadrul lor chestia asta se conservă, i-a facut pe oameni să presupună că pentru interacţiunile tari ea reprezintă şi sursa unui câmp, însă, încă o dată, nu ştim cu siguranţă. Vă comunic toate aceste chestiuni pentru a vă arăta modul în care legile de conservare pot fi utilizate pentru a surprinde noi legi ale fizicii.

Există şi alte legi de conservare care au fost propuse când şi când, de aceeaşi natură ca număratul. De exemplu, chimiştii credeau cândva că,

indiferent ce s-ar întâmpla, numărul atomilor de sodiu ar rămâne acelaşi. Însă atomii de sodiu nu sunt permanenţi. Este posibil de transmutat atomii unui element chimic în altul, astfel încât elementul originar să dispară complet. O altă lege despre care s-a crezut o vreme că este adevărată este aceea că masa totală a unui obiect rămâne aceeaşi. Aceasta depinde de modul în care defineşti masa, şi de faptul dacă te mai încurci sau nu şi cu noţiunea de energie. Legea conservării masei este conţinută în următoarea lege pe care o voi discuta, cea a conservării energiei.

Dintre toate legile de conservare, cea referitoare la energie este cea mai dificilă şi abstractă, şi totuşi cea mai utilă. Ea este mai greu de înţeles decât cele pe care le-am descris până aici, din cauză că în cazul sarcinii electrice şi a celorlalte, mecanismul este clar: conservarea mai mult sau mai puţin a unor obiecte. Asta nu la modul absolut, din cauza faptului că putem obţine lucruri noi din lucruri vechi, dar în esenţă chiar este o chestiune de simplă numărare. Conservarea energiei este un pic mai dificilă, pentru că, de această dată, avem în continuare un număr care nu se schimbă în timp, dar un număr ce nu reprezintă nimic în particular. Aş dori să fac un soi de analogie puerilă pentru a explica asta.

Vreau să vă imaginaţi că o mamă are un copil pe care îl lasă singur într-o cameră cu 28 de cuburi absolut indestructibile. Copilul se joacă toată ziua cu cuburile, iar atunci când mama se întoarce, ea găseşte într-adevăr 28 de cuburi; ea verifică mereu conservarea cuburilor! Aceasta continuă preţ de câteva zile, până când, într-o zi, intrând în cameră, mama găseşte doar 27 de cuburi. Totuşi, ea zăreşte un cub care a căzut afară: copilul l-a aruncat pe fereastră. Primul lucru pe care trebuie să îl aveţi în vedere în legătură cu legile de conservare, este să urmăriţi dacă nu cumva chestia pe care încercaţi să o verificaţi iese prin pereţi. Acelaşi lucru s-ar putea întâmpla şi invers, dacă vreun băieţel care vine să se joace cu copilul îşi aduce cu el nişte cuburi. Evident, acestea sunt probleme de reţinut atunci când vorbiţi despre legile de conservare.

Să presupunem că într-o zi, când mama vine să numere cuburile, găseşte doar 25. Ea bănuieşte însă că pe celelalte 3 copilul le-a ascuns într-o cutiuţă de jucărie, aşa încât spune: „Am să deschid cutiuţa.“ „Nu,“ răspunde el, „nu poţi s-o deschizi.“ Fiind o mamă isteaţă, femeia replică: „Ştiu că atunci când este goală, cutiuţa cântăreşte 16 uncii, iar fiecare cub cântăreşte 3 uncii, fapt pentru care ceea ce am să fac este să cântăresc cutiuţa.“ Astfel, totalizând numărul de cuburi, ea ar obţine:

$$\text{Nr. de cuburi care se văd} + \frac{\text{Greutatea cutiuței} - 16 \text{ uncii}}{3 \text{ uncii}}$$

ceea ce ne dă 28. O vreme, treaba asta funcţionează foarte bine, până-ntr-o zi când suma nu se verifică aşa cum trebuie. Totuşi, mama observă că apa murdară din cădiţă şi-a schimbat nivelul. Ea ştie că apa are 6 inci adâncime atunci când nu este nici un cub în ea, şi că nivelul ei urcă cu $^1/_4$ dintr-un inci pentru fiecare cub scufundat în apă, aşa încât adaugă un alt termen, obținând acum:

$$\text{Nr. de cuburi care se văd} + \frac{\text{Greutatea cutiuței} - 16 \text{ uncii}}{3 \text{ uncii}} + \frac{\text{Nivelul apei} - 6 \text{ inci}}{\frac{1}{4} \text{ inci}}$$

ceea ce încă o dată ne dă 28. Pe măsură ce copilul devine tot mai ingenios, iar mama sa continuă să fie la fel de ingenioasă, trebuie adăugați tot mai mulți termeni, fiecare din ei reprezentând cuburi, însă din punctul de vedere matematic ei nu constituie decât nişte calcule abstracte, întrucât cuburile nu se văd.

Aş dori acum să interpretez analogia mea şi să vă spun ce este comun şi ce diferă în raport cu conservarea energiei. Mai întâi, presupuneți că în toate situațiile nu vedeți niciodată nici un cub. Termenul „nr. de cuburi care se văd“ se exclude întotdeauna. Pe urmă, mama va fi tot calculând o sumedenie de termeni precum „cuburi în cutie“, „cuburi în apă“, şi aşa mai departe. În privința energiei avem diferența că, atât cât ştim noi, nu există unități elementare. Mai exact, spre deosebire de cazul cuburilor, numerele care rezultă pentru energie nu sunt întregi. Bănuiesc că sărmanei mame i s-ar putea întâmpla ca, atunci când calculează un termen, să îi iasă $6^1/_8$ cuburi, iar pentru altul să îi dea $^7/_8$ cuburi, restul fiind 21, ceea ce în total face tot 28. Cam aşa stau lucrurile cu energia.

Ceea ce am aflat în legătură cu energia este faptul că avem o schemă cu o serie de reguli. Cu fiecare set separat de reguli putem calcula un număr pentru câte un gen aparte de energie. Atunci când adunăm toate numerele, ne dă mereu aceeaşi sumă. Dar, din câte ştim, nu există practic porţii, unități. Este un lucru abstract, pur matematic, faptul că există un număr astfel încât, ori de câte ori îl calculăm, nu se schimbă. Mai bine de atât nu mă pricep să-l interpretez.

Energia aceasta are tot felul de forme, analoage cu cuburile în cutiuță, cuburile în apă, şi aşa mai departe. Există energie datorată mişcării, numită

energie cinetică, energie datorată interacţiunii gravitaţionale (i se spune energie potenţială gravitaţională), energie termică, energie electrică, energie luminoasă, energie elastică în arcuri şi altele de genul acesta, energie nucleară... şi chiar şi o energie pe care o particulă o posedă doar graţie simplei sale existenţe, energie direct dependentă de masa particulei respective. După cum fără îndoială cunoaşteţi, aceasta din urmă constituie contribuţia lui Einstein. $E = mc^2$ reprezintă celebra ecuaţie a legii la care mă refer.

Chiar dacă am menţionat un număr mare de energii, aş dori să indic faptul că nu suntem complet neştiutori în domeniu, şi că înţelegem relaţiile între unele şi altele dintre ele. De exemplu, ceea ce numim energie termică reprezintă în mare măsură simpla energie cinetică datorată mişcării particulelor din interiorul unui corp. Energia elastică şi energia chimică au ambele aceeaşi origine, şi anume forţele dintre atomi. Atunci când atomii se rearanjează într-un nou tipar, o energie oarecare se modifică, iar dacă acea cantitate se schimbă, înseamnă că şi o altă mărime trebuie să varieze. De pildă, atunci când ardeţi ceva, energia chimică se modifică, şi se degajă căldură undeva unde mai înainte era rece, căci totul trebuie să se verifice cu exactitate. Energia elastică şi energia chimică reprezintă, ambele, interacţiuni ale atomilor, şi cunoaştem astăzi că aceste interacţiuni constituie o combinaţie de două lucruri, o energie electrică şi din nou o energie cinetică, doar că de această dată formula ei aparţine mecanicii cuantice. Energia luminoasă nu este nimic altceva decât energie electrică, doarece lumina este actualmente interpretată ca o undă electromagnetică. Energia nucleară nu se reprezintă în termenii celorlalte; pentru moment, tot ce se poate spune este că ea constituie rezultatul forţelor nucleare. Nu mă refer aici numai la energia degajată; în nucleul de uraniu există o anumită cantitate de energie, iar atunci când acesta se dezintegrează, cantitatea de energie rămasă în nucleu se modifică, însă cantitatea totală de energie din lume nu se schimbă, aşa încât în cadrul procesului se generează o grămadă de căldură şi sumedenie de chestii, pentru a contrabalansa lucrurile.

Această lege de conservare este foarte utilă în multe privinţe tehnice. Vă voi da câteva exemple foarte simple pentru a vă arăta modul în care, cunoscând legea conservării energiei şi formulele de calculare a energiei, putem înţelege alte legi. Cu alte cuvinte, multe alte legi nu sunt independente, ci reprezintă doar maniere ascunse de a vorbi despre conservarea energiei. Cea mai simplă este legea pârghiilor (fig. 16).

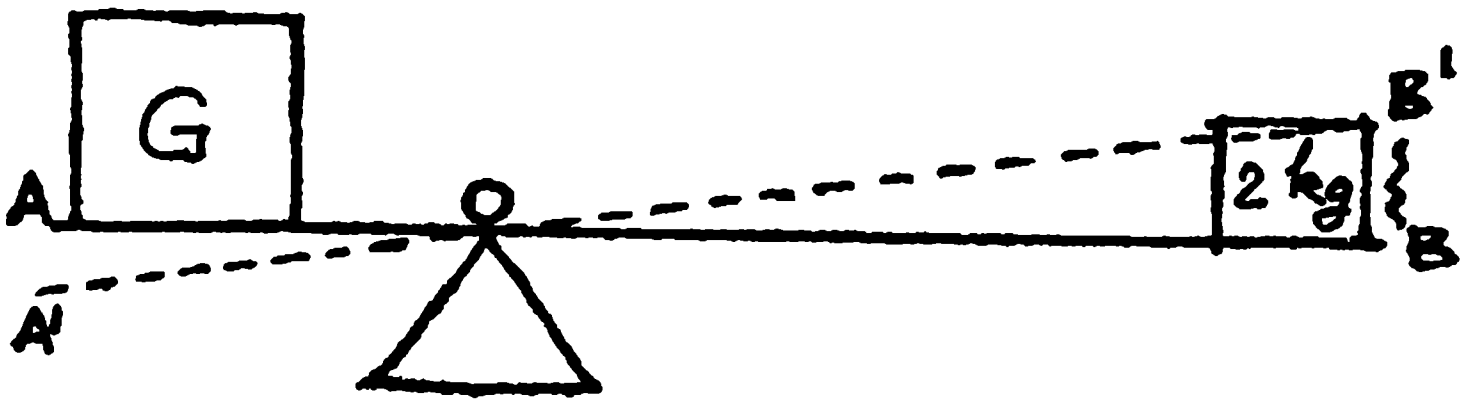


Figura 16

Avem o pârghie montată pe o articulaţie. Lungimea unuia din braţe este de 1 metru, iar a celuilalt de 4 metri. Mai întâi, trebuie să dau legea pentru energia gravitaţională, şi anume cea care spune că dacă avem un număr de greutăţi, se ia fiecare greutate şi se înmulţeşte cu înălţimea ei faţă de pământ, după care se adună toate aceste rezultate, obţinându-se energia gravitaţională totală. Să presupunem că pe braţul lung aşezăm o greutate de 2 kilograme, iar pe cel scurt o misterioasă greutate necunscută – totdeauna, prin X se notează necunoscuta, aşa că haideţi să o numim G, pentru a da impresia că ne situăm peste nivelul obişnuit! Întrebarea care se pune acuma este: cât trebuie să fie valoarea lui G pentru a contabalansa pârghia şi a o legăna fără efort în sus şi în jos? Dacă pârghia se apleacă uşor în orice direcţie, înseamnă că energia este aceeaşi, indiferent dacă poziţia este paralelă cu pământul, sau dacă este astfel înclinată încât greutatea de 2 kilograme să se ridice cu, să zicem, 1 centimetru. Dacă energia se conservă, nu prea contează în care parte se înclină pârghia, şi nici măcar dacă ea se răstoarnă, cu condiţia ca cele două greutăţi să nu se desprindă de ea. De asemenea, nu contează faţă de ce nivel se măsoară înălţimile greutăţilor şi poziţiile intermediare prin care trec ele. Dacă greutatea de 2 kilograme urcă un centimetru, cât coboară G? Din schiţă (fig. 16) puteţi vedea că dacă AO este 1 metru şi OB este 4 metri, atunci, când BB' este 1 centimetru, AA' va fi $^1/_4$ centimetri. Acum să aplicăm legea pentru energia gravitaţională. În momentul iniţial toate înălţimile erau zero, deci energia totală este zero. După încheierea mişcării, pentru a obţine energia gravitaţională înmulţim greutatea de 2 kilograme cu înălţimea de 1 centimetru şi adunăm rezultatul la produsul dintre greutatea necunoscută G şi înălţimea $-^1/_4$ centimetri. Suma trebuie să dea acelaşi rezultat ca la început: zero. Deci

$$2 - \frac{G}{4} = 0, \quad \text{deci } G \text{ trebuie să fie } 8$$

Acesta este unul din modurile în care poate fi înțeleasă legea simplă a pârghiilor, pe care, desigur, o cunoşteați. Dar este interesant că nu numai ea, ci sute de alte legi pot fi strâns legate de diferite forme de energie. V-am dat acest exemplu numai pentru a vă arăta cât este ea de utilă.

Singurul necaz este, desigur, faptul că în practică nu se verifică, din cauza frecării existente în furcă. Dacă avem ceva în mişcare, de exemplu o minge care se rostogoleşte la înălțime constantă, acel obiect se va opri din cauza frecării. Ce s-a întâmplat cu energia cinetică a mingii? Răspunsul este că energia ei de mişcare s-a transferat atomilor din podea şi din minge, ca energie de vibrație. La scara la care percepem noi lumea, ni se pare că bila este o sferă bine lustruită, însă atunci când privim la scară mică, lucrurile sunt mult mai complicate: vedem miliarde de atomi minusculi, cu tot felul de forme neregulate. Privită de suficient de aproape, mingea este ca un bolovan plin de asperități, alcătuit din astfel de cocoloaşe. Podeaua arată la fel, o chestie plină de hârtoape. Vă dați seama că dacă dați de-a dura acest bolovan monstruos de-a lungul acestei podele rugoase, atomii se vor tot împunge şi vor tot tremura. După trecerea chestiei ăsteia, atomii întâlniți de ea în cale încă se vor mai fi scuturând puțin de pe urma ghionturilor primite; deci în podea rămâne o anumită cantitate de mişcare de vibrație, sau energie termică. La prima vedere, pare că legea conservării energiei este falsă, însă energia are tendința de a se ascunde de noi, iar pentru a ne asigura că ea este încă acolo ne sunt necesare termometre şi alte aparate de măsură. Găsim că, indiferent cât de complicat ar fi procesul, energia se conservă, chiar şi dacă nu cunoaştem legile detaliate ale acestuia,

Prima demonstrație a legii conservării energiei nu aparține unui fizician, ci unui medic. El a făcut-o utilizând şoareci. Dacă ardeți alimente, puteți măsura câtă energie degajă ele. Dacă, apoi, cu aceeaşi cantitate de alimente sunt hrăniți nişte şoareci, acestea sunt tranformate, cu ajutorul oxigenului, în dioxid de carbon, exact ca la ardere. Măsurând energia în fiecare din cazuri, se descoperă că ființele se comportă la fel ca lucrurile. Legea conservării energiei este la fel de adevărată pentru viață ca şi pentru alte fenomene. Pentru că veni vorba, este interesant faptul că fiecare lege sau principiu pe care le ştim despre lucrurile „moarte", şi pe care le testăm în raport cu marile fenomene ale vieții, funcționează la fel de bine şi acolo. Nu există până acum nici o dovadă că ceea ce se petrece în lucrurile vii este în mod necesar diferit, cel puțin în privința legilor fizicii, de ceea ce se întâmplă în lucrurile nevii, chiar dacă cele vii se poate să fie mult mai complexe.

Cantitatea de energie din alimente, care ne spune câtă căldură, cât lucru mecanic, etc., se pot genera, se măsoară în calorii. Atunci când auziți vorbindu-se de calorii, nu înseamnă că mâncați ceva ce se cheamă calorii; este pur şi simplu vorba de măsura cantității de energie termică existentă în hrană. Uneori fizicienii se simt atât de superiori şi de deştepți, încât multora le-ar face plăcere să-i prindă cu ceva aiurea. Vă voi oferi ceva cu care să-i prindeți: ar trebuie să le fie foarte ruşine de modul în care iau energia şi o măsoară într-o puzderie de feluri diferite, cu nume diferite. Este absurd ca energia să poată fi măsurată în calorii, ergi, electron-volți, picioare ori livră, B.T.U., cai-putere ori oră, kilowatt-oră... toate exprimând acelaşi lucru. Este ca şi atunci când avem banii exprimați în dolari, lire sterline, şi aşa mai departe, numai că, spre deosebire de situația economică, în care rata de schimb se poate modifica, prostiile astea se află într-un raport absolut rigid. Dacă este să facem vreo analogie, atunci ea ar fi cea dintre şilingi şi lire sterline: 20 de şilingi fac o liră. Însă o complicație pe care fizicienii o permit este aceea că, în loc de a avea un număr precum 20, ei operează cu numere iraționale de genul 1, 6183178 şilingi la o liră. Vă veți fi gândind poate că măcar fizicienii teoreticieni moderni de mare clasă folosesc o unitate standard; când colo, găsiți lucrări în care energia este exprimată în Kelvin, megahertzi şi, mai nou, ultima invenție, Fermi la puterea minus unu. Pentru cei care doresc o dovadă că fizicienii sunt şi ei oameni, mărturia stă în tâmpenia tuturor diferitelor unități pe care le folosesc pentru măsurarea energiei.

Există o serie de fenomene interesante din natură care ne pun în fața unor probleme ciudate privind energia.

De curând au fost descoperiți ceva ce se cheamă quasari. Aceştia se găsesc imens de departe şi emit atâta energie sub formă de lumină şi unde radio, încât se naşte întrebarea de unde provine aceasta. Dacă legea conservării energiei este adevărată, atunci starea quasarului după ce a emis această cantitate enormă de energie trebuie să fie diferită de starea lui anterioară. Întrebarea este: provine ea oare din energie gravitațională, este oare obiectul colapsat gravitațional, într-o stare diferită din punct de vedere gravitațional? Sau această puternică emisie provine din energie nucleară? Nimeni nu ştie. Ați putea avansa ideea că poate legea conservării energiei nu este adevărată. Ei bine, atunci când un lucru este investigat atât de incomplet precum sunt investigați quasarii – ei se găsesc atât de departe încât astronomii cu greu îi pot vedea – extrem de rar se întâmplă ca, dacă ceva pare să vină în conflict

cu legile fundamentale, aceasta să se datoreze faptului că legile fundamentale sunt greşite; de obicei, pur şi simplu nu se cunosc detaliile respective.

Un alt exemplu interesant de folosire a legii conservării energiei este reacţia în care un neutron se dezintegrează într-un proton, un electron şi un antineutrin. S-a crezut la început că neutronul se transformă doar în proton plus electron. Însă, putând fi măsurată energia fiecărei particule, s-a constatat că cele ale protonului şi electronului adunate nu dădeau energia neutronului. Existau două posibilităţi. Se putea ca legea conservării energiei să nu fie corectă; în fapt, o bucată de vreme Bohr* a avansat ideea că poate legea funcţiona doar statistic, în medie. Însă acuma se vădeşte că cealaltă posibilitate era cea corectă, şi anume faptul că energia nu se verifica din cauză că din reacţie mai ieşea ceva, ceva ce noi astăzi numim antineutrin. Acesta preia energia. Aţi putea afirma că singurul motiv pentru existenţa lui este de a face ca energia să se conserve. Însă el face să se conserve multe alte lucruri, precum impulsul, momentul cinetic şi alte mărimi fizice, iar foarte recent s-a demonstrat că astfel de neutrini chiar există.

Acest exemplu ilustrează o stare de fapt. Cum este posibil să extindem legile noastre într-o regiune de care nu suntem siguri? De ce suntem atât de încrezători că, pentru simplul motiv că am verificat conservarea de energie aici, putem afirma că atunci când obţinem un fenomen nou, el trebuie să asculte de această lege?

Din când în când, citiţi prin ziare că fizicienii au descoperit că una sau alta din legile lor favorite este greşită. Constituie atunci o eroare să afirmi că o lege este adevărată într-o regiune în care nu ai căutat încă? Dacă nu vei spune niciodată că o lege este adevărată într-un domeniu în care încă nu ai căutat, înseamnă că nu vei şti nimic. Dacă singurele legi pe care le descoperi sunt cele pe care tocmai le-ai terminat de studiat, înseamnă că nu vei putea face niciodată predicţii. Şi totuşi, singura utilitate a ştiinţei este de a merge mai departe şi a încerca să ghicească. Deci ceea ce facem de fiecare dată este să ne riscăm prestigiul, iar în cazul energiei, lucrul cel mai de aşteptat este ca ea să se conserve şi în alte locuri. Bineînţeles, aceasta înseamnă că ştiinţa este nesigură; în clipa în care rosteşti un enunţ despre un domeniu al experienţei pe care nu l-ai observat în mod direct, trebuie să fii nesigur. Însă trebuie totdeauna să facem afirmaţii despre regiuni pe care nu le-am studiat, sau toată treaba ar fi fără rost. De exemplu, masa unui obiect se schimbă atunci când el se mişcă, din cauza conservării energiei. Datorită relaţiei

* Niels Bohr, fizician danez.

dintre masă şi energie, energia asociată mişcării apare ca o masă suplimentară, deci obiectele devin mai grele atunci când se află în micare. Newton credea că nu se pune problema, şi că masele rămân constante. Atunci când s-a aflat că ideea newtoniană era greşită, toată lumea a ,afirmat iar şi iar ce lucru rău reprezintă faptul că fizicienii au descoperit că s-au înşelat. De ce îşi închipuiseră ei că au dreptate? Pentru că efectul este foarte slab şi se manifestă numai atunci când ne apropiem de viteza luminii. Dacă un titirez se învârteşte, masa lui este, până la a multa zecimală, aceeaşi ca şi dacă nu se învârteşte. Ar fi trebuit ei oare să spună: „dacă nu se mişcă mai repede decât aşa şi pe dincolo, atunci masa nu se schimbă"? Căci în felul acesta ar fi fost siguri de afirmația lor. Nu, pentru că în stilul acesta, dacă s-ar fi întâmplat ca experimentul să fie făcut numai cu titirezi din lemn, cupru şi oțel, ar fi însemnat ca ei să trebuiască să spună: „titirezii de lemn, cupru şi oțel, care nu se mişcă mai repede decât aşa şi pe dincolo..." Vedeți dumneavoastră, noi nu cunoaştem toate condițiile necesare unui experiment. Nu se ştie dacă un titirez radioactiv ar avea o masă care să se conserve. Deci, dacă vrem să dăm ştiinței o cât de mică utilitate, trebuie să facem presupuneri. În loc să descriem pur şi simplu nişte experimente efectuate, trebuie să propunem legi care merg dincolo de domeniul observat. Nu e nimic rău în asta, chiar dacă prin aceasta ştiința devine nesigură. Dacă până acum v-ați închipuit cumva că ştiința este sigură... ei bine, v-ați înşelat amarnic.

Atunci, întorcându-ne la tabelul nostru cu legi de conservare (fig. 14), putem adăuga energia. Atât cât ştim noi, ea se conservă perfect. Nu vine în porții. Acuma, întrebarea este dacă reprezintă ea cumva sursa unui câmp. Răspunsul este afirmativ. Einstein a interpretat gravitația ca fiind generată de energie. Energia şi masa sunt echivalente, şi astfel, interpretarea lui Newton potrivit căreia masa este cea care produce gravitația, a fost reformulată în enunțul că energia produce gravitația.

Există şi alte legi similare cu conservarea energiei, în sensul că este vorba de nişte valori numerice. Una dintre ele este cea referitoare la impuls. Dacă se iau toate masele constituente ale unui obiect, se înmulțesc cu vitezele corespunzătoare, iar rezultatele se adună între ele, se obține impulsul particulelor respective; iar impulsul total se conservă. Energia şi impulsul sunt percepute în momentul actual ca fiind foarte stâns legate între ele, aşa încât le-am plasat în aceeaşi coloană a tabelului nostru.

* * *

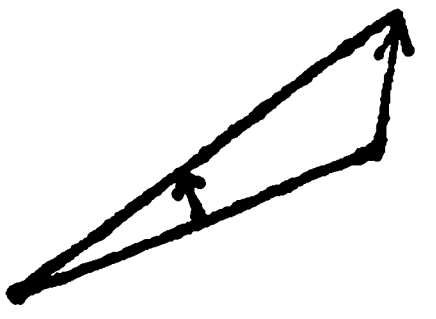


Figura 17

Un alt exemplu de mărime care se conservă este momentul cinetic. Acesta reprezintă aria măturată în unitatea de timp de către corpurile aflate în mişcare. Alegem, spre exemplu, o origine oarecare, şi facem produsul dintre masa unui obiect aflat în mişcare şi rata de variaţie a ariei măturate de un segment ce uneşte acel obiect cu originea aleasă (fig. 17); dacă adunăm rezultatele pentru toate obiectele existente, obţinem momentul cinetic. Iar această mărime fizică nu variază. Deci avem conservarea de moment cinetic. Întâmplător, dacă ştii prea multă fizică, ai putea fi înclinat să crezi la prima vedere că momentul cinetic nu se conservă. Asemenea energiei, el apare sub diferite forme. Deşi majoritatea oamenilor cred că apare numai în cadrul mişcării, el se manifestă, aşa cum vă voi ilustra, şi sub alte forme. Dacă aveţi o sârmă şi mişcaţi un magnet înspre ea, mărind astfel fluxul magnetic ce o străbate, se va produce un curent electric (aşa funcţionează generatoarele electrice). Să ne imaginăm că în locul firului avem un disc, pe care se găsesc sarcini electrice analoage electronilor din sârmă (fig. 18). Apropii acum foarte repede un magnet de disc, de foarte departe, exact de-a lungul axei centrale. Apare o variaţie a fluxului magnetic şi, exact ca în cazul sârmei, sarcinile electrice vor începe să se mişte, iar dacă discul este prins pe o roată, el va începe să se învârtească. Aceasta nu arată a conservare de moment cinetic, deoarece, atunci când magnetul se găseşte departe de disc, nu se roteşte nimic. Am obţinut rotaţie din nimic, iar aceasta este împotriva regulii. „A, da", veţi spune dumneavoastră, „ştiu: trebuie să mai existe şi un alt fel de interacţiune, care să facă magnetul să se învârtească în sens opus." Nu este aşa. Nu există nici o forţă electrică asupra magnetului care să caute să-l răsucească în sens opus.

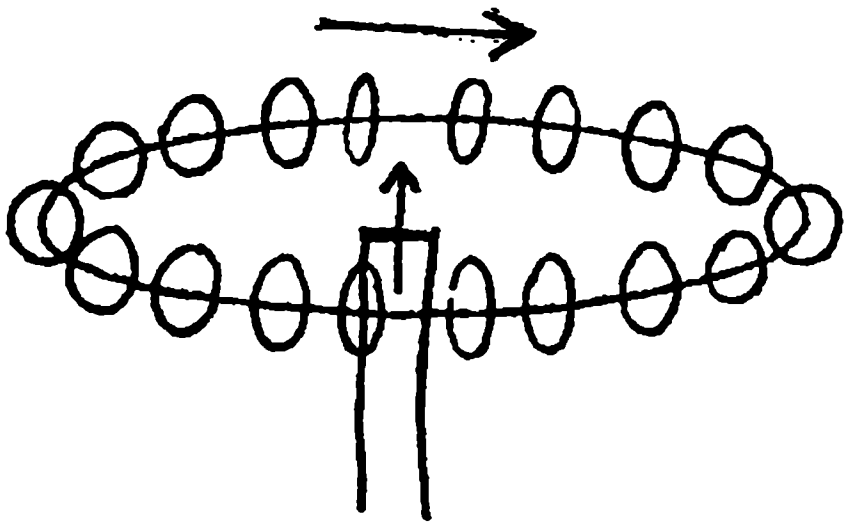


Figura 18

Explicaţia constă în faptul că momentul cinetic apare sub două forme: una din ele constituie momentul cinetic datorat mişcării, iar cealaltă reprezintă momentul cinetic din cadrul câmpurilor electrice şi magnetice. Chiar dacă nu se prezintă sub formă de mişcare, în câmpul din jurul magnetului există un moment cinetic, iar sensul lui este opus celui de rotaţie.

Dacă luăm cazul opus, lucrurile devin şi mai clare (fig. 19). Dacă avem numai particulele şi magnetul, apropiate între ele, şi totul se află în repaus, eu afirm că există un moment cinetic în cadrul câmpului, o formă ascunsă de moment cinetic, ce nu apare efectiv ca rotaţie. Atunci când îndepărtăm magnetul în jos şi îl înlăturăm, toate câmpurile se separă, iar momentul cinetic trebuie acum să apară şi să înceapă să învârtească discul. Legea după care se roteşte este legea inducţiei electromagnetice.

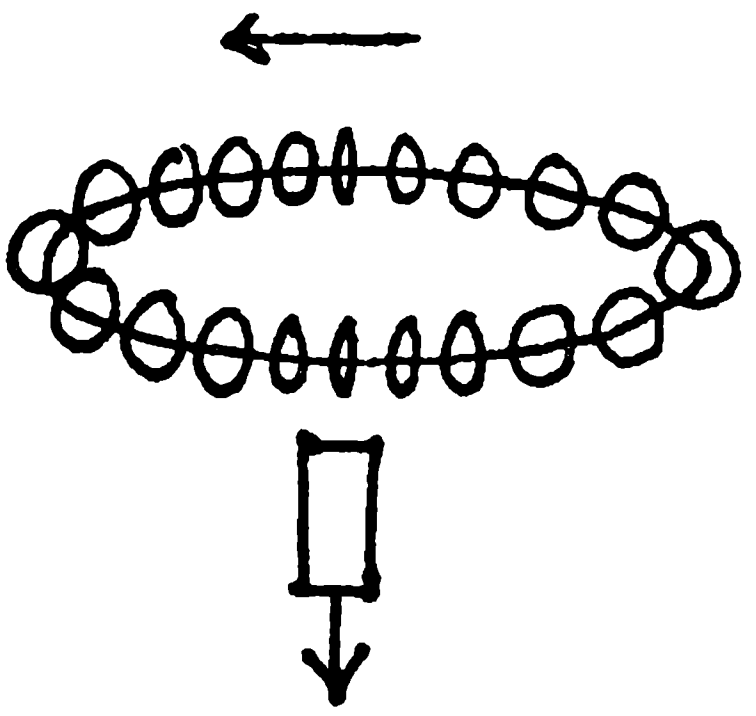


Figura 19

Îmi este foarte greu să vă spun dacă momentul cinetic vine sau nu în porţii. La prima vedere, pare absolut imposibil ca el să vină în unităţi, deoarece momentul cinetic depinde de direcţia pe care se face proiecţia sistemului. Este vorba despre variaţia unei arii şi, în mod evident, aceasta va fi diferită, după cum este privită pieziş sau din faţă. Dacă momentul cinetic vine în porţii, şi, să zicem, te uiţi la ceva care prezintă 8 unităţi, atunci, dacă priveşti dintr-un unghi uşor diferit, numărul de unităţi va fi foarte puţin diferit, poate un piculeţ mai mic de 8. Însă 7 nu este un piculeţ mai mic decât 8; este o cantitate bine definită, mai mică decât 8. Deci momentul cinetic nu are cum să vină în porţii. Totuşi, această demonstraţie este eludată de către subtilităţile şi ciudăţeniile mecanicii cuantice, în cadrul căreia, dacă măsurăm momentul cinetic în raport cu orice axă, obţinem, în mod destul de uimitor, un număr întreg de unităţi. Nu este vorba de genul de unităţi pe care să le poţi număra, ca pe sarcinile electrice. Momentul cinetic vine în porţii în sensul matematic

că valoarea pe care o obţinem la fiecare măsurare este un număr întreg bine determinat, înmulţit cu o cantitate dată. Însă nu putem interpreta această cantitate la fel ca pe sarcinile electrice, pe care ne putem imagina numărându-le separat: una, încă una, şi-ncă una. La momentul cinetic porţiile formează un tot, dar sunt mereu în număr întreg... ceea ce este ciudat.

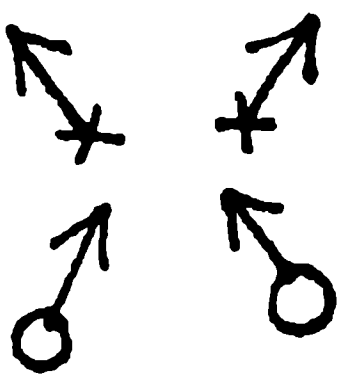


Figura 20

Există şi alte legi de conservare. Ele nu sunt atât de interesante ca cele pe care le-am descris, şi nu se referă chiar la conservări de numere. Să presupunem că avem un dispozitiv oarecare cu particule mişcându-se cu o anumită simetrie bine determinată, şi să zicem că simetria este bilaterală (fig. 20). Atunci, potrivit legilor fizicii, luând în considerare toate mişcările şi ciocnirile, v-aţi aştepta, şi pe bună dreptate, ca dacă priviţi sistemul la un moment de timp ulterior, el să fie în continuare bilateral simetric. Deci există un soi de conservare: conservarea simetriei. Ar trebui ca ea să figureze în tabel, dar nu este la fel ca atunci când măsori o cantitate, şi o vom discuta în mult mai mare detaliu în prelegerea următoare. Motivul pentru care ea nu este foarte interesantă în cadrul fizicii clasice este acela că situaţiile în care există astfel de condiţii iniţiale cuminţi din punctul de vedere al simetriei sunt foarte rare şi, ca atare, nu este o lege de conservare foarte importantă sau practică. Însă în mecanica cuantică, unde avem de-a face cu sisteme foarte simple precum atomii, constituţia lor internă prezintă adesea un tip de simetrie, cum ar fi simetria bilaterală, al cărei caracter se păstrează. Prin urmare, ea este o lege importantă pentru înţelegerea fenomenelor cuantice.

O întrebare interesantă este dacă există sau nu o bază mai profundă pentru aceste legi, sau dacă trebuie oare să le luăm aşa cum sunt. Voi discuta această chestiune în prelegerea următoare, însă există un lucru pe care aş dori să-l punctez acum. Atunci când abordăm aceste idei la nivel popular, pare că avem o sumedenie de concepte fără legătură între ele; dar, la o înţelegere mai profundă a diferitelor principii, între concepte apar adânci interconexiuni, fiecare din ele implicându-le într-un fel oarecare pe altele. Un exemplu îl constituie relaţia dintre relativitate şi necesitatea conservării locale. Dacă aş fi enunţat acest lucru fără demonstraţie, s-ar fi putut să vi se pară un fel de miracol faptul că dacă nu poţi spune cât de repede te mişti, atunci înseamnă că, dacă ceva se conservă, aceasta trebuie să se facă fără a se sări dintr-un loc în altul.

Ajuns în acest punct, aş dori să indic modul în care conservările de moment cinetic, impuls şi alte câteva lucruri, sunt într-o oarecare măsură legate între ele. Conservarea momentului cinetic are de-a face cu aria măturată de particule aflate în mişcare. Dacă avem o mulţime de particule (fig. 21) şi considerăm originea (x) foarte departe, atunci distanţele până la ele sunt aproape aceleaşi pentru toate obiectele. În acest caz, singurul lucru care contează din perspectiva ariilor măturate sau a conservării momentului cinetic, sunt componentele mişcării pe direcţia care în figura 21 este verticală. Ceea ce descoperim atunci este faptul că suma tuturor maselor înmulţite cu vitezele verticale corespunzătoare trebuie să fie constantă. Aceasta pentru că

Figura 21

momentul cinetic se conservă în raport cu orice punct, iar dacă punctul ales este suficient de depărtat, tot ce este relevant sunt masele şi vitezele particulelor. Acest fapt, la rândul lui, implică altceva, conservarea unui alt lucru, care este atât de strâns legată de conservarea momentului cinetic, încât nici nu m-am sinchisit să o trec în tabel. Este vorba despre un principiu referitor la centrul de greutate (fig. 22).

O masă aflată într-o cutie nu poate pur şi simplu să dispară de la sine dintr-o poziţie şi să se mute în alta. Acest fapt nu are nici o legătură cu conservarea masei: masa este aceeaşi, doar că este mutată dintr-un loc în altul. Sarcina electrică ar putea să facă acest lucru, dar masa nu. Daţi-mi voie să vă explic de ce. Legile fizicii nu sunt afectate de mişcare, aşa încât putem presupune că această cutie se deplasează încet în sus. Considerăm acum momentul cinetic în raport cu un punct nu prea îndepărtat x. Pe măsură ce cutia se deplasează în sus, dacă masa stă liniştită înăuntru, în poziţia 1, ea va determina o arie cu o anumită rată. După ce masa s-a mutat în poziţia 2, aria va creşte cu

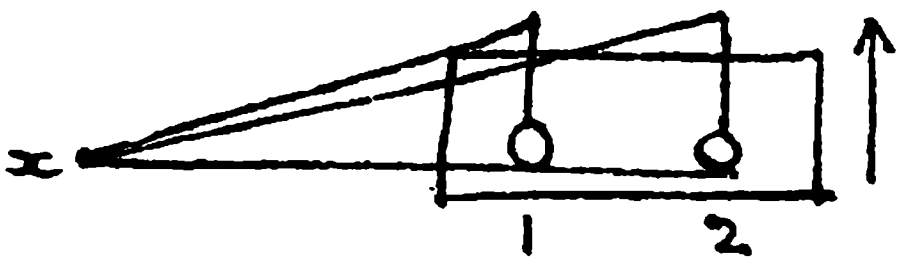


Figura 22

o rată mai rapidă, deoarece, chiar dacă altitudinea rămâne aceeaşi, cutia deplasându-se în continuare în sus, distanța de la x la masă a crescut. Potrivit conservării de moment cinetic, rata cu care se schimbă aria nu poate fi modificată şi, ca atare, o masă pur şi simplu nu se poate muta dintr-un loc în altul, numai dacă nu cumva se exercită forță şi asupra a altceva, pentru a contrabalansa momentul cinetic. Acesta este motivul pentru care rachetele aflate în spațiul liber nu au cum să funcționeze... dar funcționează. Dacă ați priceput cum stă treaba pentru o sumedenie de mase, atunci, dacă mişcați una din ele în față, trebuie să mişcați o alta în spate, astfel încât mişcarea totală a maselor înainte şi înapoi să fie nulă. Aşa funcționează racheta. La început, ea se află, să zicem, în repaus în spațiul gol, iar apoi expulzează nişte gaz înspre înapoi, şi porneşte în față. Ideea e că, pentru toată materia din lume, centrul de masă, media tuturor maselor, este tot acolo unde era şi mai înainte. Partea care ne interesează s-a pus în mişcare, iar o parte neinteresantă, de care nu ne pasă, s-a dus în spate. Nu există nici o teoremă care să spună că lucrurile din lume care ne interesează se conservă – numai totalul a ceva se conservă.

A descoperi legile fizicii este precum a încerca să îmbini piesele unui puzzle. Avem toate aceste piese disparate, care în zilele noastre proliferează rapid. Multe din ele sunt lăsate la o parte şi nu se pot potrivi cu celelalte. De unde ştim că locul lor este împreună? De unde ştim că într-adevăr ele toate sunt părți ale uneia şi aceleiaşi imagini, încă incomplete? Nu suntem siguri, şi într-o oarecare măsură acest lucru ne îngrijorează, însă suntem încurajați de caracteristicile comune ale mai multor piese. Pe toate este reprezentat un cer albastru, sau toate sunt confecționate din aceeaşi esență de lemn. Toate diferitele legi ale fizicii ascultă de aceleaşi principii de conservare.

4 SIMETRIA ÎN LEGILE FIZICII

Pentru mintea omenească, simetria pare a fi absolut fascinantă. Ne place să privim lucruri simetrice din natură, precum sferele perfect simetrice reprezentate de planete şi de Soare, sau cristalele simetrice reprezentate de fulgii de zăpadă, sau florile, care sunt aproape simetrice. Totuşi, nu despre simetria obiectelor din natură vreau să discut eu aici, ci mai curând despre simetria legilor fizicii. Este uşor de înţeles în ce mod poate fi simetric un obiect, dar cum poate avea simetrie o lege a fizicii? Evident, nu poate, însă fizicienilor le face plăcere să folosească cuvinte obişnuite pentru a denumi altceva. În cazul de faţă, ei percep legile fizicii într-un mod foarte asemănător cu modul în care se percepe simetria obiectelor, şi numesc aceasta simetria legilor. Despre acest lucru voi discuta în continuare.

Ce este simetria? Dacă vă uitaţi la mine, sunt simetric în raport cu stânga şi dreapta... cel puţin din punctul de vedere a ceea ce se observă la exterior. O vază poate fi simetrică, în acelaşi fel sau în alte feluri. Cum puteţi defini simetria? Faptul că sunt simetric în raport cu stânga şi dreapta înseamnă că, dacă aşezaţi tot ce este într-o parte în partea cealaltă şi viceversa – dacă pur şi simplu schimbaţi între ele cele două părţi – eu voi arăta exact la fel. Un pătrat are o simetrie de un gen aparte, pentru că dacă îl rotiţi cu 90 de grade, arată la fel. Profesorul Weyl,* matematicianul, a dat o definiţie excelentă a simetriei, în sensul că un lucru este simetric dacă îi puteţi face ceva astfel încât, după ce aţi terminat, el să arate la fel ca înainte. Acesta este sensul în care afirmăm că legile fizicii sunt simetrice: există lucruri pe care le putem efectua asupra legilor fizicii sau asupra modului nostru de a

* Herman Weyl, 1885 – 1955, matematician german.

reprezenta legile fizicii, care nu au nici un efect şi care lasă totul neschimbat. Acesta este aspectul legilor fizicii care ne va preocupa în prelegerea de față.

Cel mai simplu exemplu de astfel de simetrie – veți vedea că nu este câtuşi de puțin vorba de ce ați fi crezut, de stânga-dreapta, sau de orice altceva de genul acesta – se numeşte translație în spațiu. Ea are următorul înțeles: în cazul în care construiți un aparat de măsură oarecare şi efectuați cu el un experiment oarecare asupra a ceva, iar apoi vă apucați să construiți un acelaşi aparat de măsură şi să efectuați acelaşi experiment asupra aceloraşi lucruri, cu singura deosebire că în loc să o faceți acolo, o faceți aici, atunci în experimentul translatat se va întâmpla exact ceea ce s-a întâmplat şi în cel originar. De fapt, aici unde ne găsim noi acum, acest lucru nu este adevărat. Dacă efectiv construin aici un aparat şi îl deplasăm cu vreo 7 metri mai la stânga mea, o să ajungă în perete, ceea ce ar cam complica lucrurile. Atunci când se defineşte noțiunea de translație, este necesar să se ia în considerare tot ceea ce ar putea afecta situația, aşa încât, atunci când mutăn chestia aceea, să mutăm totul împreună cu ea. De exemplu, dacă dispozitivul ar implica un pendul, şi l-am muta cu 20.000 de mile mai la dreapta, nu ar mai funcționa cum trebuie, căci acesta reclamă existența atracției gravitaționale a Pământului. Totuşi, dacă ne închipuim că mutăm şi Pământul odată cu dispozitivul, atunci el s-ar comporta la fel. Necazul cu această situație este că trebuie translatat tot ceea ce ar putea avea vreo influență asupra ei. Acest lucru sună ca o falsă problemă, deoarece reiese că pur şi simplu poți translata un experiment, iar dacă nu funcționează, nu ai decât să presupui că nu ai translatat destule chestii… deci că până la urmă îți va reuşi în mod inevitabil. De fapt, nu este o falsă problemă, pentru că nu este evident apriori că el este menit să-ți reuşească. Lucrul remarcabil în privința naturii este tocmai faptul că este posibil să translatezi suficiente chestii astfel încât ea să se comporte la fel. Acesta este un enunț constructiv.

Aş dori să ilustrez faptul că afirmația este adevărată. Să luăm ca exemplu Legea Atracției Universale, care spune că forța dintre obiecte variază invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele; şi aş vrea să vă reamintesc faptul că un corp răspunde la o forță modificându-şi viteza în timp, înspre direcția forței. Dacă avem două obiecte, cum ar fi o planetă ce se roteşte în jurul unui soare, şi le mutăm împreună, este evident că distanța dintre ele nu se schimbă şi, ca atare, nici forța. Mai mult, în noua situație ele se vor mişca şi totul se va petrece ca şi mai înainte. Faptul că legea menționează „distanța

dintre corpuri", şi nu vreo distanţă absolută în raport cu ochiul central al Universului, înseamnă că ea este translatabilă în spaţiu.

Aşadar, aceasta este prima simetrie – translaţia în spaţiu. Următoarea ar putea fi numită translaţia în timp, dar, mai bine, haideţi să spunem că decalarea în timp nu importă. Dăm drumul unei planete pe o direcţie anume, să se rotească în jurul unui soare; dacă am putea da drumul planetei iar şi iar, cu două ore mai târziu, sau cu doi ani mai târziu – cu un alt început – dar exact în acelaşi fel, atunci ea s-ar comporta exact în acelaşi mod, deoarece, încă o dată, Legea Atracţiei Universale vorbeşte despre viteză, şi nu despre vreun moment absolut de timp de la care s-ar presupune că trebuie să măsori totul. De fapt, în acest exemplu particular, lucrurile nu sunt pe de-a-ntregul sigure. Atunci când am discutat despre gravitaţie, am menţionat posibilitatea ca forţa gravitaţională să se modifice în timp. Aceasta ar însemna că translaţia în timp nu constituie o afirmaţie validă, din cauză că, dacă peste un miliard de ani constanta atracţiei gravitaţionale va fi mai slabă decât acum, atunci nu este adevărat că experimentul nostru cu planeta şi soarele ar mai decurge la fel. Din câte ştim până astăzi (eu am discutat legile aşa cum le ştim noi astăzi; cât mi-aş dori să le pot discuta aşa cum le vom şti mâine!), deci din câte ştim noi astăzi, un decalaj în timp nu are nici o importanţă.

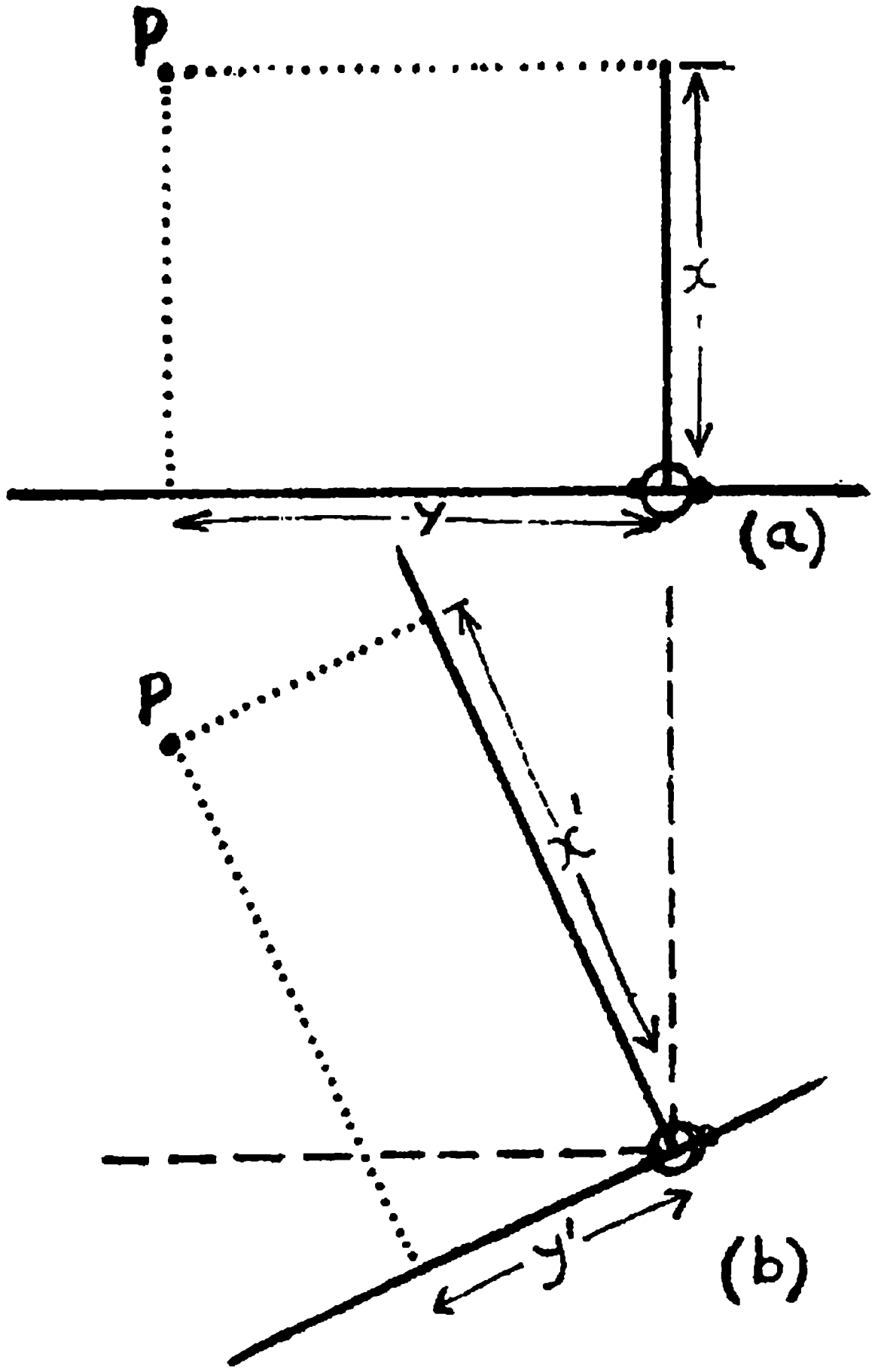
Cunoaştem faptul că acest lucru nu este adevărat într-o anumită privinţă. El este adevărat pentru ceea ce numim noi acum legile fizicii; dar unul din aspectele legate de lume (ce ar putea fi mult deosebit) este acela că ea arată ca şi când Universul ar fi început într-un moment bine determinat, şi că de atunci încoace toate lucrurile se tot îndepărtează unele de altele. Aţi putea numi acest lucru o condiţie de geografie, analoagă situaţiei în care, atunci când facem o translaţie în spaţiu, trebuie să translatăm totul. În acest sens, aţi putea afirma că regulile referitoare la timp sunt aceleaşi şi că, odată cu toate celelalte, trebuie decalată şi expansiunea Universului. Am fi putut efectua o altă analiză, în care Universul să fi luat startul mai târziu; însă noi nu dăm startul Universului, şi nu avem nici un control asupra acestei situaţii, neexistând nici o modalitate de a defini din punct de vedere experimental o atare idee. Prin urmare, cel puţin atât cât priveşte ştiinţa, efectiv nu ne putem pronunţa. Rămâne doar faptul că situaţia lumii pare să se schimbe în timp, că galaxiile se îndepărtează unele de altele, aşa încât, dacă v-aţi pomeni în cine ştie ce poveste SF la un moment de timp necunoscut, l-aţi putea determina măsurând distanţele medii dintre acestea. Va să zică, decalată în timp, lumea nu va mai arăta la fel.

Acuma, se obişnuieşte ca în zilele noastre să se facă distincţie între legile fizicii, care ne spun cum se vor mişca lucrurile dacă le porneşti în anumite condiţii date, şi enunţul referitor la cum a apărut efectiv lumea; asta din cauza a cât de puţin cunoaştem despre acest fapt. Se consideră de obicei că istoria astronomică, sau istoria cosmologică, este puţin diferită de legile fizicii. Şi totuşi, dacă aş fi pus la încercare să definesc în vreun fel această diferenţă, m-aş afla la mare ananghie. Cea mai valoroasă caracteristică a legilor fizicii este universalitatea lor; or, dacă ceva este universal pe lumea asta, apoi aceasta este expansiunea tuturor nebuloaselor. Prin urmare, nu am cum să definesc diferenţa. Totuşi, dacă mă mărginesc să nu ţin cont de originea Universului şi să consider numai legile cunoscute ale fizicii, atunci un decalaj în timp nu importă.

Haideţi să luăm şi alte exemple de legi de simetrie. Una dintre ele este rotaţia în spaţiu în jurul unui centru fixat. Dacă efectuez un experiment oarecare cu un dispozitiv construit într-un anumit loc, iar apoi mai efectuez unul (de preferat translatat, ca să nu mă-ncurce cel dinainte) exact la fel, dar rotit astfel încât toate axele să fie orientate diferit, acesta va da acelaşi rezultat. Încă o dată, trebuie să rotim tot ceea ce este relevant. Dacă lucrul în cauză este un orologiu de pe vremea bunicului, şi îl punem orizontal, atunci pendula va sta pur şi simplu lipită de peretele camerei, fără să funcţioneze. Dar dacă rotim deopotrivă Pământul (lucru care se petrece tot timpul) ceasul va continua să meargă.

Reprezentarea matematică a acestei posibilităţi de rotire este una cât se poate de interesantă. Pentru a descrie ce se întâmplă într-o anumită situaţie, noi folosim numere care ne spun unde se petrece situaţia respectivă. Ele sunt numite coordonatele unui punct, şi îndeobşte folosim trei astfel de numere pentru a descrie cât de sus se găseşte un punct deasupra unui plan, cât de departe se află el, să zicem, în faţa noastră (sau în spate, dacă numărul este negativ) şi respectiv cât de departe la stânga. În cazul nostru nu mă voi preocupa de sus şi jos, căci la rotaţii trebuie să folosesc doar două din cele trei coordonate. Haideţi să notăm poziţia în faţa mea cu x, iar cea la stânga cu y. Astfel, pot să localizez poziţia oricărui corp, precizând cât de în faţă şi cât de la stânga se află el. Aceia dintre dumneavoastră care au venit din New York City cunosc faptul că numerele de străzi funcţionează foarte bine exact aşa... sau cel puţin funcţionau până când le-a venit să schimbe numele lui Sixth Avenue! Ideea matematică cu privire la rotaţie este următoarea: dacă

localizez un punct în maniera descrisă, dând coordonatele x şi y, iar altcineva, orientat cu faţa în altă direcţie, localizează acelaşi punct în aceeaşi manieră, dar calculând un x' şi un y' în raport cu propria lui poziţie, se poate observa că x-ul meu constituie o combinaţie de coordonatele celuilalt. Legătura care ne dă transformarea o constituie faptul că x devine un amestec de x' şi y', şi la fel şi y. Legile naturii ar trebui astfel scrise încât, dacă faceţi un astfel de amalgam şi îl substituiţi în ecuaţii, forma acestora să nu se schimbe. Aceasta este maniera în care simetria apare sub formă matematică: scrieţi ecuaţiile



Raportul dintre punctul P şi mine este descris prin intermediul a două numere, x şi y; x reprezintă cât de departe se află P în faţa mea, iar y reprezintă cât de departe la stânga.

Dacă mă aflu în acelaşi loc, dar orientat pur şi simplu cu faţa în altă direcţie, acelaşi punct P este descris de două noi numere, x' şi y'.

Figura 23

utilizând anumite litere, după care există o manieră de a schimba pe x şi y în alt x – x' – şi alt y – y' – folosind o formulă exprimată în termeni de vechii

x şi y, iar ecuaţiile obţinute arată exact la fel, doar că au prim peste tot. Acest fapt înseamnă pur şi simplu că celălalt om va vedea cu aparatul său de măsură lucrurile comportându-se la fel cum le văd şi eu cu aparatul meu, care este altfel orientat.

Voi mai da un exemplu foarte interesant de lege de simetrie. Este o chestiune de viteză uniformă în linie dreaptă. Se crede că legile fizicii rămân neschimbate la aplicarea unei viteze uniforme în linie dreaptă. Acest lucru poartă numele de Principiul Relativităţii. Dacă avem o navă spaţială în interiorul căreia se găseşte un dispozitiv oarecare cu care se efectuează ceva, şi dacă mai avem un dispozitiv similar cu primul, aici pe Pământ, atunci, dacă nava se deplasează cu viteză constantă, cineva din ea ar înregistra cu aparatul său de măsură exact aceleaşi efecte pe care le-aş înregistra şi eu, care mă aflu aici în repaus, cu aparatul meu. Bineînţeles, dacă respectivul priveşte afară, sau dacă dă peste un obstacol exterior, sau ceva de genul acesta, asta-i altă treabă; însă atât cât ne rezumăm la mişcarea lui cu viteză uniformă în linie dreaptă, legile fizicii îi apar la fel cum îmi apar şi mie. Aşa stând lucrurile, nu pot preciza care din noi doi se mişcă.

Mai înainte de a trece mai departe, trebuie să accentuez aici că în toate aceste transformări şi în toate aceste simetrii nu este vorba de a muta un univers întreg. În cazul translaţiei în timp, afirmaţia că îmi imaginez că mut toţi timpii întregului Univers nu îmi spune nimic. La fel, enunţul potrivit căruia, dacă iau toate câte există în întregul Univers şi le mişc în spaţiu, atunci ele se vor comporta la fel, este lipsit de conţinut. Faptul remarcabil este acela că, dacă iau şi mut un dispozitiv, atunci, dacă mă asigur de o sumedenie de condiţii şi includ destule aparate de măsură, pot delimita o bucată de lume pe care să o mut în raport cu media restului de stele, aceasta în continuare neavând nici o importanţă. În cazul relativităţii, aceasta înseamnă că cineva care se deplăsează cu viteză constantă în raport cu media restului de nebuloase, nu sesizează nici un efect. Altfel spus, dacă nu te uiţi pe geam, este imposibil de determinat prin intermediul vreunor efecte din cadrul experimentelor efectuate într-un mobil, faptul dacă el se mişcă sau nu în raport cu totalitatea stelelor.

Această afirmaţie a fost făcută prima dată de către Newton. Haideţi să considerăm legea lui referitoare la gravitaţie. Ea ne spune că forţele sunt invers proporţionale cu pătratele distanţelor, şi că o forţă produce o modificare a vitezei. Să presupunem acum că am calculat ce se întâmplă atunci

când o planetă se roteşte în jurul unui soare fix, şi că, în continuare, vreau să calculez ce se întâmplă atunci când o planetă se roteşte în jurul unui soare aflat în derivă. În această situație, toate vitezele pe care le-am obținut în primul caz vor diferi în al doilea caz: trebuie să le adun cu o viteză constantă. Însă legea este enunțată în termeni de *modificări* ale vitezei, deci ceea ce se întâmplă este că forța exercitată asupra planetei de către soarele fix este aceeaşi cu forța exercitată asupra planetei de către soarele aflat în derivă şi, ca urmare, modificările de viteză ale celor două planete vor fi şi ele identice. Deci orice viteză suplimentară cu care pornesc în studiul celei de-a doua planete pur şi simplu se conservă, iar schimbările sunt başca. Din punctul de vedere al exprimării legilor, rezultatul de ansamblu al adăugării unei viteze constante în cadrul calculelor matematice este acelaşi. Deci, studiind sistemul solar şi modul în care planetele se rotesc în jurul Soarelui, nu ne putem da seama dacă acesta se află sau nu la rândul său în derivă prin spațiu. Potrivit legii lui Newton, o astfel de derivă nu are nici un efect asupra mişcării planetelor în jurul lui; ca atare, Newton a adăugat faptul că „mişcarea corpurilor unele față de celelalte în spațiu este aceeaşi, indiferent dacă spațiul însuşi se află în repaus în raport cu stelele fixe, sau dacă el se deplasează cu viteză uniformă în linie dreaptă față de acestea."

Odată cu trecerea timpului au fost descoperite noi şi noi legi, ulterioare lui Newton, printre care şi cele ale electricității, datorate lui Maxwell.* Una din consecințele legilor electricității o constituia faptul că trebuia să existe nişte unde, undele electromagnetice – lumina este un exemplu de astfel de undă – care să se propage cu 300.000 de kilometri pe secundă, *punct*. Vreau să zic, 300.000 de kilometri pe secundă, oricum ai da-o. Aşa că acum era uşor să te prinzi de repaus, căci legea propagării luminii cu 300.000 de kilometri pe secundă era cu siguranță (la prima vedere) o lege ce nu permitea ca ceva să se deplaseze fără a produce un efect oarecare. Este evident, nu-i aşa, că dacă vă găsiți într-o navă spațială care se mişcă cu 100.000 de kilometri pe secundă, iar eu, aflat în repaus, proiectez din spate un fascicul luminos printr-un mic hublou al navei, atunci, din moment ce dumneavoastă mergeți cu 100.000 de kilometri pe secundă, iar lumina are 300.000 de kilometri pe secundă, ea vă va apărea că traversează nava cu doar 200.000 de kilometri pe secundă. Însă, se dovedeşte că dacă se efectuează acest experiment, lumina vă apare ca trecând pe lângă dumneavoastră cu 300.000 de kilometri pe secundă, la fel ca şi pe lângă mine.

---

* James Clark Maxwell. 1831-1879, primul profesor de fizică experimentală de la Cambridge.

Faptele din natură nu sunt atât de uşor de înţeles, iar faptul din acest experiment se situează în mod atât de evident împotriva bunului simţ, încât există oameni care nici în zilele noastre nu dau crezare rezultatului! Însă experimentele au indicat iar şi iar că viteza luminii este de 300.000 de kilometri pe secundă, indiferent de cât de repede v-aţi mişca. Întrebarea care se pune acum este cum de este oare posibil aşa ceva. Einstein, precum şi Poincaré,* au realizat că singurul mod în care o persoană aflată în mişcare şi una aflată în repaus ar putea înregistra aceeaşi valoare a vitezei, este ca percepţiile lor în privinţa timpului şi spaţiului să fie diferite, ca ceasurile din nava spaţială să ticăie într-un alt ritm decât cele de pe Pământ, şi aşa mai departe. Aţi putea spune: „A, dar dacă urmăresc ticăitul ceasului din navă pot să-mi dau seama că acesta rămâne în urmă." Nu, căci creierul dumneavoastră merge şi el în acelaşi ritm încetinit! Aşadar, cu precauţia că în nava spaţială toate funcţionează exact la fel ca pe Pământ, se poate născoci un aranjament prin care să apară că viteza luminii în navă are valoarea de 300.000 de kilometri de-ai navei pe o secundă de-a navei, iar că aici ea este egală cu 300.000 de kilometri de-ai mei pe o secundă de-a mea. A pune problema astfel constituie un lucru foarte ingenios şi, fapt destul de remarcabil, posibil de făcut.

Am menţionat deja una dintre consecinţele acestui Principiu al Relativităţii, şi anume faptul că nu puteţi spune cât de repede vă deplasaţi în linie dreaptă: amintiţi-vă cazul celor două maşini, A şi B (fig. 24), din prelegerea anterioară. La cele două capete ale maşinii B se producea câte un eveniment. Un om aflat în mijlocul maşinii susţinea că evenimentele (x şi y) s-au produs în acelaşi moment, pentru că el înregistra simultan lumina provenită de la acestea. Însă omul din maşina A, aflat în mişcare cu viteză constantă în raport cu B, nu percepea evenimentele în acelaşi timp; propriu-zis, pe x îl vedea primul, pentru că, mişcându-se într-acolo, lumina de la acesta ajungea la el mai devreme decât cea de la y. Observaţi că una din consecinţele principiului simetriei în raport cu mişcarea rectilinie uniformă – cuvântul acesta, simetrie, vrea să spună că nu puteţi stabili a cui perspectivă este cea corectă – este aceea că, atunci când ne referim la totalitatea a ceea ce se petrece în lume „în această clipă", exprimarea noastră nu are nici o noimă. Dacă vă deplasaţi cu viteză constantă în linie dreaptă, atunci lucrurile pe care dumneacoastă le consideraţi că se petrec simultan nu sunt aceleaşi cu cele care îmi apar mie ca fiind simultane, chiar dacă, în momentul asociat de mine simultaneităţii, noi trecem unul prin dreptul celuilalt: atunci când intervine în discuţie o

* Jules Henri Poincaré, 1854-1912, om de ştiinţă francez.

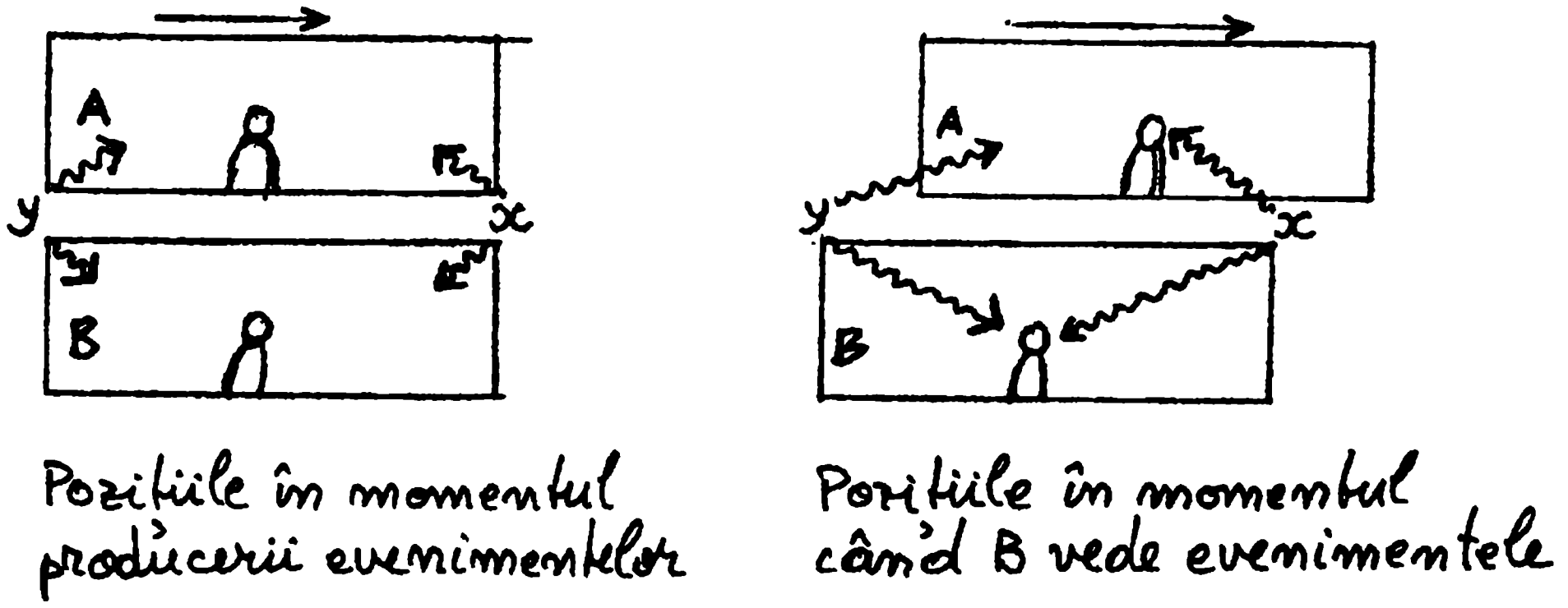


Figura 24

distanţă, nu se poate cădea de acord asupra a ce vrea să zică „în această clipă". Acest fapt constituie o transformare profundă a concepţiilor noastre despre spaţiu şi timp, în intenţia de a păstra principiul că mişcarea cu viteză constantă nu poate fi decelată. În esenţă, ceea ce se întâmplă aici este că două evenimente care dintr-o anumită perspectivă par a fi simultane, dintr-o altă perspectivă au loc la momente de timp diferite, dacă între ele există o distanţă considerabilă.

Puteţi remarca faptul că această chestiune aduce foarte mult cu cea a coordonatelor x şi y în plan. Dacă stau cu faţa la public, atunci culisele scenei pe care mă aflu sunt la acelaşi nivel cu mine: ele au acelaşi x, dar y diferit. Însă dacă mă rotesc cu 90° şi mă uit din nou la aceeaşi pereche de ziduri, dar dintr-o altă perspectivă, atunci unul se află în faţa mea, iar celălalt în spate: au x primi diferiţi. Tot aşa se întâmplă şi că două evenimente care dintr-o anumită perspectivă par a fi simultane (acelaşi t), dintr-o altă perspectivă pot apărea a fi la momente de timp diferite (t' diferiţi). Ca atare, a fost elaborată o generalizare a rotaţiei bidimensionale despre care am discutat, într-un plan determinat printr-o axă a spaţiului şi una a timpului. În acest fel timpul este reunit cu spaţiul, pentru a forma o lume cvadridimensională. Nu este vorba de o simplă alipire artificială, de genul explicaţiilor oferite în majoritatea cărţilor de popularizare a ştiinţei, în care se afirmă: „adăugăm spaţiului timpul, pentru că un punct nu trebuie doar localizat, ci şi precizat când". Faptul este adevărat, dar asta n-ar da naştere unui spaţiutimp cu adevărat cvadridimensional, ci pur şi simplu ar alătura cele două lucruri. Spaţiul real are, într-un anumit sens, trăsătura că existenţa lui este independentă de perspectivele particulare şi că, atunci când este privit din diferite perspective, o anumită cantitate de „înainte-înapoi" se poate amesteca cu câtva „stânga-dreapta".

Într-un mod analog, o anumită cantitate de „viitor-trecut“ temporal se poate amesteca cu o anumită cantitate de spațiu. Spațiul şi timpul trebuie să fie absolut întrepătrunse; în urma acestei descoperiri, Minkowski a spus că „spațiul în sine şi timpul în sine se vor topi în simple umbre, iar ceea ce va supraviețui doar, va fi un soi de contopire a lor“.

Vă prezint acest exemplu particular în asemenea detaliu, deoarece el constituie efectiv începutul studiului legilor de simetrie în fizică. Tocmai Poincaré a fost cel care a sugerat să se analizeze lucrurile care se pot face cu ecuațiile astfel încât forma acestora din urmă să rămână neafectată. Atitudinea lui a fost tocmai aceea de a da atenție simetriilor legilor fizicii. Simetriile legate de translația în spațiu, decalajul în timp şi aşa mai departe, nu erau foarte profunde; însă simetria referitoare la viteza uniformă în linie dreaptă este foarte interesantă şi are tot felul de consecințe. Mai mult, aceste consecințe pot fi extinse la legi pe care nu le cunoaştem. De exemplu, acceptând faptul că acest principiu este valabil în privința dezintegrării unui mezon miu, putem afirma că nici utilizând mezonii miu nu putem determina cât de repede ne deplasăm cu o navă spațială; şi astfel, tot cunoaştem ceva despre dezintegrarea mezonilor miu, chiar dacă nu avem idee, în primul rând, de ce se dezintegrează ei.

Există multe alte simetrii, unele din ele de un tip foarte diferit. Voi menționa doar câteva. Una dintre ele este aceea că puteți înlocui un atom cu altul de acelaşi fel, fără să conteze din punct de vedere fenomenologic. Acuma, s-ar putea să întrebați: „Ce înțelegeți prin atom de acelaşi fel?“ Tot ce pot să vă răspund este că înțeleg un atom care, atunci când îl înlocuieşte pe celălalt, nu schimbă lucrurile! Într-o anumită privință, se pare că fizicienii vorbesc tot timpul fără noimă, nu-i aşa? Există multe tipuri diferite de atomi, iar dacă înlocuiți unul cu altul de un tip diferit, contează; însă dacă înlocuiți unul cu altul de acelaşi tip, nu contează. Definiția aceasta arată a cerc vicios. Însă adevărata semnificație a acestui lucru este aceea că *există* atomi de acelaşi fel; că *este* posibil de găsit grupe, clase de atomi, astfel încât să-i puteți înlocui unul cu altul fără să conteze. Din moment ce numărul de atomi dintr-o bucățică de material este 1 urmat de vreo 23 de zerouri, este foarte important faptul că ei sunt la fel, că nu sunt toți diferiți. Este într-adevăr foarte interesant că putem împărți atomii în doar o sută şi ceva de tipuri, deci afirmația că putem înlocui un atom cu un altul de acelaşi gen este plină de conținut. Cel mai mult ea este plină de conținut în cadrul mecanicii cuantice,

însă îmi este imposibil să vă explic aceasta aici, în parte, dar numai în parte, din cauza faptului că această prelegere se adresează unui public fără pregătire matematică specială; în orice caz, este ceva cât se poate de subtil. În mecanica cuantică, afirmația că puteți înlocui un atom cu un altul de acelaşi fel are consecințe minunate. Ea dă naştere unor fenomene ciudate în heliul lichid, lichidul curgând prin conducte fără a întâmpina nici o rezistență, practic de-a pururi. În fapt, ea reprezintă punctul de plecare în construcția întregului tabel periodic al elementelor, şi constituie originea forței care mă împiedică să trec prin podea. Nu pot intra în detalii în toate aceste privințe, dar vreau să subliniez importanța observării acestor principii.

Probabil că de-acum sunteți convinşi că toate legile fizicii sunt simetrice în raport cu orice fel de transformări, aşa încât vă voi oferi câteva care nu se verifică. Prima este schimbarea scării. Nu este adevărat că dacă realizați un dispozitiv, iar apoi construiți un altul, cu fiecare piesă exact la fel, din acelaşi material, dar de două ori mai mare, acesta va funcționa exact la fel ca primul. Cei dintre dumneavoastră cărora noțiunea de atom le este familiară, sunt conştienți de acest fapt, căci, dacă aş face dispozitivul de un miliard de ori mai mic, aş avea în el doar cinci atomi, şi nu pot să fabric, de exemplu, o unealtă numai din cinci atomi. Dacă împingem lucrurile atât de departe, este absolut evident că nu putem schimba scala; dar faptul că această lege nu este corectă a devenit vizibil chiar dinainte de a se fi încetățenit completa evidență a reprezentării atomice. Probabil că din când în când ați citit prin ziare că cineva a realizat din bețe de chibrit modelul la scară al vreunei catedrale – cu toate cele, cu mai multe niveluri, mai delicată şi mai gotică decât orice stil gotic. De ce nu construim niciodată catedrale aşa, din bârne mari, cu acelaşi grad uriaş al detaliilor, precum în povestea cu căsuța de turtă dulce? Răspunsul este că dacă am putea construi una, ea ar fi atât de înaltă şi de grea încât s-ar nărui. A! Dar ați uitat că dacă vreți să comparați două lucruri, trebuie să schimbați tot ceea ce există în sistem. Micuța catedrală făcută din bețe de chibrit este atrasă de Pământ, deci, pentru a face comparația, catedrala mare ar trebui să fie atrasă de către un Pământ încă şi mai mare. Ghinion. O planetă mai mare ar atrage-o încă şi mai tare, iar bârnele s-ar frânge cu încă şi mai multă siguranță!

Un alt exemplu de ceva ce nu reprezintă o lege de simetrie îl constituie afirmația că, dacă vă rotiți pe loc cu viteză unghiulară constantă cu o navă cosmică, nu puteți spune dacă vă aflați sau nu în mişcare. Nimic mai fals.

Puteți. Eventual vă apucă amețeala. Dar există şi alte efecte: lucrurile sunt împinse înspre pereți de către forța centrifugă (sau cum veți fi vrând să îi spuneți... sper că în public nu sunt profesori de fizică de liceu, să mă corecteze!). Folosind un pendul sau un giroscop, se poate spune dacă Pământul se învârteşte sau nu, şi probabil că ați sesizat faptul că numeroase observatoare şi muzee dispun de aşa-numite pendule ale lui Foucault,* care demonstrează că Pământul se roteşte, fără ca pentru aceasta să fie nevoie a privi stelele. Este posibil să afirmăm, fără ca pentru aceasta să ne uităm în afară, că Pământul se roteşte cu noi cu viteză unghiulară constantă, pentru că legile fizicii nu rămân neschimbate în raport cu o astfel de mişcare.

Mulți au avansat ideea că în mod real Pământul se roteşte în raport cu galaxiile, şi că dacă ar fi să rotim şi galaxiile, atunci n-ar mai conta. Ei bine, nu ştiu ce s-ar întâmpla dacă ar fi să rotim întregul univers, iar la ora actuală nu avem cum să ne pronunțăm. Şi nici nu avem în clipa de față vreo teorie care să descrie influența unei galaxii asupra lucrurilor de aici, şi din care să reiasă – în mod direct, fără trişări sau forțări – faptul că inerția la rotație, efectul rotației, proprietatea că apa dintr-o găleată care se învârteşte pe loc are suprafața concavă, reprezintă rezultatul unei forțe din partea obiectelor din jur. Afirmația că lucrurile ar sta în felul acesta este cunoscută sub numele de Principiul lui Mach, însă până acum nu s-a demonstrat că lucrurile chiar stau aşa. Chestiunea experimentală mai directă este aceea dacă, aflându-ne în rotație cu viteză uniformă relativ la nebuloase, sesizăm sau nu vreun efect. Răspunsul este afirmativ. Dar dacă ne deplasăm cu o navă cosmică în linie dreaptă cu viteză uniformă, sesizăm vreun efect? Răspunsul este negativ. Sunt două lucruri diferite. Nu putem afirma că orice mişcare este relativă. Nu acesta este conținutul relativității. Relativitatea spune că viteza constantă în raport cu nebuloasele este nedetectabilă.

Următoarea lege de simetrie pe care aş dori să o discut este una interesantă, şi care are o istorie interesantă. Aceasta este chestiunea reflexiei în spațiu. Construiesc un dispozitiv, să zicem un ceas; apoi, la distanță mică de acesta, construiesc un alt ceas, o imagine în oglindă a primului. Ele se potrivesc unul cu altul asemenea unei perechi de mânuşi, stânga şi dreapta; fiecare arc ce este răsucit în primul ceas într-un sens, în cel de-al doilea ceas este răsucit în sens opus, şi aşa mai departe. Întorc cele două ceasuri, le aşez în

* Jean Bernard Léon Foucault, 1819 – 1868, fizician francez.

poziţii corespondente, şi le las să meargă. Întrebarea este, vor arăta ele totdeauna aceeaşi oră? Va funcţiona oare întregul mecanism al unuia din ceasuri ca o imagine în oglindă a celuilalt? Nu ştiu ce părere veţi fi având dumneavoastră. Probabil veţi fi presupunând că este adevărat; majoritatea oamenilor presupun asta. Desigur, nu este vorba aici despre geografie. În cadrul geografiei putem distinge între stânga şi dreapta. Putem spune că, dacă ne aflăm în Florida şi ne uităm spre New York, atunci oceanul se situează la dreapta noastră. Lucrul acesta face diferenţa între stânga şi dreapta, iar dacă funcţionarea ceasului nostru ar implica plasarea lui în apa mării, atunci cel construit invers nu ar merge, pentru că acesta nu ar sta în apă. În această situaţie, ceea ce ar trebui să ne imaginăm ar fi că geografia Pământului se inversează şi ea la cel de-al doilea ceas: tot ceea ce este implicat trebuie întors invers. Nici istoria nu ne interesează. Dacă veţi fi cumpărând un şurub dintr-un magazin de scule, există toate şansele ca el să aibă filetul pe dreapta; aţi putea argumenta că cel de-al doilea ceas nu ar fi la fel, pentru că e mai greu să faceţi rost de şuruburi cu filet pe stânga. Dar acest fapt este doar o chestiune de ce fel de lucruri se fabrică. Una peste alta, la prima vedere se pare că nimic nu importă. Dacă funcţionarea ceasului s-ar baza pe gravitaţie, se dovedeşte că Legea Atracţiei Universale nu dă naştere la diferenţe. Dacă, în plus, el ar avea componente electrice şi magnetice, legile electricităţii şi magnetismului sunt de aşa natură încât tot ar funcţiona. Dacă ceasul ar implica reacţii nucleare obişnuite, nici atunci n-ar conta. Însă există ceva care poate face diferenţa, şi la care mă voi referi imediat.

S-ar putea să cunoaşteţi faptul că se poate măsura concentraţia de zahăr în apă trecând prin aceasta lumină polarizată. Dacă în calea luminii aşezaţi un polarizor care să o facă să intre în apă de-a lungul unui anumit plan, se constată că, dacă vreţi să urmăriţi printr-un alt polarizor lumina ce iese pe partea cealaltă, acesta trebuie rotit la dreapta în raport cu primul cu atât mai mult cu cât stratul de apă cu zahăr traversat de lumină este mai gros. Dacă treceţi lumina în sens invers prin soluţie, planul de polarizare a ei se roteşte tot spre dreapta. Prin urmare, aici există o diferenţă între stânga şi dreapta.

Am putea folosi la ceasuri apă cu zahăr şi lumină polarizată. Să presupunem că avem un vas cu apă cu zahăr şi trecem lumina prin el, rotind cel de-al doilea polarizor astfel încât ea să iasă pe partea cealaltă; realizăm apoi montajul corespunzător pentru al doilea ceas, în speranţa că planul de polarizare a luminii se va roti spre stânga. Nu; se va roti tot spre dreapta, şi lumina nu va trece prin al doilea polarizor. Folosind apă cu zahăr, cele două ceasuri pot fi făcute să difere între ele! Acesta este un fapt cât se poate de remarcabil,

şi la prima vedere se pare că legile fizicii nu sunt simetrice în raport cu reflexia. Totuşi, zahărul pe care l-am folosit va fi provenind din sfeclă de zahăr; însă zahărul este o moleculă destul de simplă, şi poate fi obținut în laborator din dioxid de carbon şi apă, dacă parcurgeți o groază de etape intermediare. În cazul în care încercați zahărul artificial, care din punct de vedere chimic arată identic cu cel natural în toate privințele, el nu roteşte planul luminii.

Bacteriile consumă zahăr; dacă introduceți bacterii în apa cu zahăr artificial, se dovedeşte că ele consumă doar jumătate din acesta, iar după ce au terminat de mâncat zahărul, constatați că soluția rămasă roteşte lumina spre *stânga*. Explicația este următoarea. Zahărul este o moleculă cu mai mulți atomi, aranjați într-un mod complex. Dacă realizați exact acelaşi aranjament, dar schimbând stânga cu dreapta, atunci orice distanță între orice doi atomi este aceeaşi la ambele molecule, energia lor este exact aceeaşi, şi toate fenomenele chimice care nu implică viața se petrec la fel. Însă ființele sesizează o diferență. Bacteriile consumă unul din tipurile de zahăr, dar nu şi pe celălalt. Zahărul provenit din sfeclă de zahăr este în întregime de un singur fel, molecule dextrogire, şi deci roteşte lumina într-un singur sens. Bacteriile pot consuma doar acest gen de molecule. Atunci când produceți zahăr din substanțe care nu sunt asimetrice în sine, cum ar fi nişte molecule simple de gaz, obțineți ambele tipuri în cantități egale. Apoi, dacă introduceți bacterii, ele consumă tipul pe care îl pot mânca, şi rămâne celălalt. Acesta este motivul pentru care planul de polarizare a luminii este rotit în sens opus. După cum a descoperit Pasteur,* dacă privim la microscop, putem deosebi cele două tipuri de molecule. Putem în mod categoric arăta că explicația stă în picioare, separând zahărul şi singuri dacă vrem, fără ajutorul bacteriilor. Însă lucrul cu adevărat interesant este că pot să o facă *ele*. Înseamnă oare aceasta că procesele vieții nu ascultă de aceleaşi legi? Evident că nu înseamnă aşa ceva. Se pare că în organismele vii există foarte multe molecule complexe, care toate prezintă un soi de torsiune. Unele dintre cele mai reprezentative molecule din cadrul ființelor sunt proteinele. Ele au aspect de tirbuşon cu înşurubare pe dreapta. Din câte ştim noi, dacă am reuşi să producem aceleaşi lucruri din punct de vedere chimic, dar răsucite la stânga, ele nu ar funcționa din punct de vedere biologic, din cauză că, atunci când ar întâlni alte proteine, nu s-ar îmbina între ele. Un fir răsucit la stânga se potriveşte cu altul răsucit

* Louis Pasteur, 1822 – 1895, bacteriolog francez.

la stânga, dar nu şi cu unul răsucit la dreapta. Bacteriile, a căror chimie prezintă torsiune spre dreapta, pot distinge între zahărul stâng şi drept.

Cum au ajuns ele astfel? Fizica şi chimia nu pot face diferența între molecule, şi nu pot produce decât ambele tipuri. Însă biologia poate. Este uşor de acceptat că explicația stă în faptul că, în urmă cu mult timp, atunci când procesele vieții şi-au făcut apariția pentru prima dată, o moleculă oarecare a început accidental să se propage prin reproducere, şi că lucrurile au continuat tot aşa până când, după mulți mulți ani, s-a ajuns la mogâldețele acestea caraghiase, cu excrescențe şi protuberanțe, care stau şi trăncănesc între ele... Nu suntem nimic altceva decât odraslele primelor câtorva molecule, iar faptul că s-a întâmplat ca acestea să se formeze într-un anumit mod şi nu în altul, reprezintă un simplu accident. Trebuia să fie ori aşa, ori invers; ori stânga, ori dreapta; după care ele s-au reprodus, şi tot continuă să se propage. Situația seamănă mult cu cea a şuruburile din magazinele de scule: se folosesc şuruburi cu filet pe dreapta pentru a fabrica noi şuruburi cu filet pe dreapta, şi tot aşa. Faptul că toate moleculele din organismele vii prezintă exact acelaşi tip de torsiune, constituie probabil una din cele mai profunde demonstrații ale uniformității arhetipurilor vieții, mergând înapoi absolut până la nivelul moleculelor.

Cu scopul de a înțelege mai bine chestiunea aceasta legată de întrebarea dacă legile fizicii sunt sau nu aceleaşi din perspectiva stânga-dreapta, ne putem pune problema în felul următor. Să presupunem că ne-am conversa la telefon cu un marțian sau cu un arcturian, şi că am dori să-i descriem diferite lucruri de pe Pământ. În primul rând, cum ar putea să înțelegă cuvintele noastre? Această chestiune a fost intens studiată de către profesorul Morisson* de la Cornell, care a pus în evidență că una din metode ar fi să începem prin a pronunța „tic, unu; tic, tic, doi; tic, tic, tic, trei;" şi aşa mai departe. Foarte curând interlocutorul nostru s-ar prinde că este vorba despre numere. Odată ce a înțeles sistemul de numerație, am putea să-i transmitem o secvență întreagă de numere care să reprezinte masele, greutățile relative ale diferiților atomi, luați la rând: „hidrogen, 1,008", apoi deuteriu, heliu şi aşa mai departe. După ce va fi analizând o vreme aceste numere, el îşi va fi dând seama că rapoartele sunt cele dintre elementele chimice şi că, prin urmare, cuvintele acelea trebuie să reprezinte numele lor. Treptat, în acest fel, s-ar înfiripa un limbaj comun. Acum vine problema. Să presupunem că, după ce ne-am mai familiarizat reciproc, el zice: „Sunteți nişte tipi de treabă. Aş dori să ştiu cum

---

* Philip Morisson, profesor de fizică american, 1964, BBC-1, serialul de televiziune „Stofa din care sunt făcuți atomii".

arătați.“ „Avem cam între 1,5 şi 2 metri“, răspundem noi, iar el întreabă: „Şi cât înseamnă un metru?“ Asta-i uşor: „un metru reprezintă de douăzeci de miliarde de ori dimensiunea atomului de hidrogen.“ Nu râdeți; este un mod posibil de a descrie ce înseamnă un metru cuiva care nu cunoaşte unitățile de măsură, în cazul în care nu putem să-i trimitem efectiv o mostră, sau să privim nişte aceleaşi obiecte. Dacă dorim să-i spunem cât suntem de înalți, există metode. Şi asta pentru că legile fizicii nu rămân neschimbate la modificarea scării, deci putem folosi acest lucru pentru a determina scara. Putem continua prin a ne descrie înfățişarea exterioară: avem între 1,5 şi 2 metri înălțime, arătăm aşa şi pe dincolo, cu simetrie bilaterală, şi ne cresc protuberanțele astea, etc. După care el zice: „Foarte interesant, dar cum arătați pe dinăuntru?“ Aşa că noi îi descriem inima şi celelalte, şi îi spunem: „Inima e în stânga.“ Întrebarea este cum îi putem noi explica lui care parte e stânga. „A, ia nişte zahăr din sfeclă de zahăr, pune-l în apă, şi lumina…“ Numai că necazul este că acolo nu există sfeclă de zahăr. Şi nici nu avem de unde să ştim dacă accidentele evoluției vieții pe Marte, chiar de vor fi produs proteine corespondente celor de aici, nu au debutat cumva cu torsiuni în sens invers. Nu există nici o cale de a explica interlocutorului care parte e stânga. După multă gândire, ajungem la concluzia că este imposibil şi renunțăm.

Totuşi, în urmă cu aproximativ cinci ani, o anumită serie de experimente au dat naştere la tot felul de semne de întrebare. Nu voi intra în detalii, dar ne-am pomenit în fața unor dificultăți din ce în ce mai mari, a unor situații din ce în ce mai paradoxale, până când, în cele din urmă, Lee şi Yang* au avansat presupunerea că poate principiul simetriei stânga-dreapta – cel potrivit căruia natura arată la fel în raport cu reflexia – nu este corect, şi că acest lucru ar ajuta la explicarea unui număr de mistere. Pentru demonstrarea acestui fapt, ei au propus câteva experimente directe, dintre care îl voi menționa pe cel mai concret care a fost efectuat.

Fie o dezintegrare radioactivă în care, de exemplu, se emite un electron şi un neutrin. Un astfel de exemplu, despre care am mai vorbit, îl constituie dezintegrarea neutronului într-un proton, un electron şi un antineutrin, şi există multe astfel de reacții radioactive în care sarcina electrică a unui nucleu creşte cu o unitate şi se emite un electron. Lucrul interesant este faptul că dacă se măsoară spinul** – la ieşire, electronii se rotesc – se găseşte că, privind din spate, acesta este pe stânga (adică, dacă electronii s-ar deplasa pe axa de la Nord la Sud, sensul lor de rotație ar fi acelaşi cu cel al

---

* Tsung-Dao Lee şi Chen Ning Yang, fizicieni chinezi, laureații Premiului Nobel în 1957.

** to spin (engl.) = a se învârti pe loc (n.t.)

Pământului). Faptul că electronul ce rezultă din dezintegrare se învârteşte întotdeauna într-un anumit mod, că prezintă o înşurubare pe stânga, are o semnificaţie bine precizată. Este ca şi când, în cadrul dezintegrării beta, arma care ar lansa electronul ar avea ţeava ghintuită. Ţevile armelor pot fi ghintuite în două feluri în raport cu direcţia de ieşire a proiectilului: cu răsucire la stânga sau cu răsucire la dreapta. Experimentul arată că electronul provine dintr-o armă ghintuită la stânga. Folosind acest fapt, putem să-l sunăm pe marţian şi să-i spunem: „Auzi, ia ceva radioactiv, un neutron, şi urmăreşte electronul care iese dintr-o astfel de dezintegrare beta. Dacă la ieşire electronul se înşurubează în sus, atunci spinul respectiv este spre *stânga*. În felul acesta se defineşte stânga. Acolo e inima.“ Prin urmare, este posibil de deosebit stânga de dreapta şi, ca atare, legea potrivit căreia lumea este simetrică în raport cu reflexia s-a năruit.

Următorul lucru despre care aş dori să vă vorbesc, este relaţia dintre legile de conservare şi legile de simetrie. În prelegerea anterioară v-am vorbit despre principiile de conservare, despre conservarea energiei, impulsului, momentului cinetic, şi aşa mai departe. Este foarte interesant faptul că pare să existe o legătură profundă între legile de conservare şi legile de simetrie. Această legătură are propria ei interpretare, cel puţin aşa cum o înţelegem noi astăzi, doar în cadrul mecanicii cuantice. Chiar şi aşa, vă voi prezenta o demonstrare a ei.

Dacă presupunem că legile fizicii pot fi descrise printr-un principiu de minim, atunci putem arăta că, dacă o lege are o astfel de formă încât să putem muta întregul echipament într-o parte, cu alte cuvinte, dacă ea este translatabilă în spaţiu, atunci trebuie să existe o conservare de impuls. Există o legătură adâncă între principiile de simetrie şi legile de conservare, însă ea reclamă presupunerea principiului de minim. În a doua prelegere am discutat o metodă de a descrie legi ale fizicii prin intermediul afirmaţiei că o particulă se deplasează dintr-un loc în altul într-un anumit interval de timp încercând diferite drumuri. Există o anumită mărime fizică pe care, în mod înşelător poate, se întâmplă să o cheme acţiune. Atunci când se calculează acţiunea de-a lungul diverselor traiectorii, se găseşte că, pentru drumul efectiv urmat de particulă, valoarea acestei mărimi este întotdeauna mai mică decât cele pentru oricare alt drum. Acest mod de a descrie legile naturii înseamnă a afirma că acţiunea exprimată prin anumite formule matematice este minimă pentru drumul efectiv din mulţimea de drumuri posibile. Un alt mod de a

spune că ceva este minim, este de a afirma că, dacă mutați foarte puțin traiectoria, în primă aproximație nu contează. Să presupunem că vă plimbați pe coline – însă coline netede – şi că ajungeți într-un loc unde este cea mai mică altitudine. Voi afirma că, dacă faceți un pas mic în față, altitudinea la care vă aflați va rămâne aceeaşi. Atunci când vă aflați la înălțime minimă sau maximă, un pas nu importă într-o primă aproximație. În schimb, dacă vă situați pe o pantă, cu un singur pas puteți coborî, sau, cu un pas în direcție opusă, puteți urca. Acesta este motivul-cheie pentru care nu contează prea mult dacă faceți un pas atunci când vă aflați în punctul cel mai de jos: dacă ar conta, atunci ați putea face un pas în vreo anumită direcție astfel încât încă să mai coborâți. Însă din moment ce sunteți în punctul cel mai de jos, acest lucru nu este posibil, deci în primă aproximație pasul pe care îl faceți nu contează. Ca atare, ştim că dacă mutăm un pic traiectoria, în primă aproximație acest lucru nu importă asupra acțiunii. Să trasăm un drum, de la A la B (fig. 25), iar acum aş dori să considerați următoarea traiectorie posibilă: mai întâi, trecem din A într-un punct imediat vecin C, apoi ne deplasăm de-a lungul unui drum CD corespunzând exact lui AB, iar de aici ajungem în B în mod absolut identic, evident, ca în prima etapă. Însă tocmai am spus că legile naturii sunt astfel încât cantitatea totală de acțiune de-a lungul lui ACDB este, în primă aproximație, aceeaşi cu cea de pe traiectoria originară AB. Voi spune chiar mai mult: dacă lumea rămâne la fel atunci când mutați totul într-o parte, atunci acțiunea de-a lungul lui AB este egală cu cea de-a lungul lui CD, pentru că deosebirea dintre ele nu constă decât în faptul că ați translatat-o pe prima până în dreptul celei de-a doua. Deci, dacă principiul de simetrie la translație este corect, atunci acțiunea de-a lungul drumului direct dintre A şi B este aceeaşi cu cea de-a lungul drumului direct dintre C şi D. În plus, pentru deplasarea reală de-a lungul traiectoriei indirecte ACDB, acțiunea totală este aproape egală cu cea de-a lungul drumului direct AB şi, prin urmare, egală cu cea doar de pe porțiunea CD. Acțiunea indirectă reprezintă suma contribuțiilor celor trei porțiuni – de la A la C, de la C la D şi, în fine, de la D la B. Deci, scăzând părțile egale, observați probabil că cele două contribuții, cea de la A la C adunată cu cea de la D la B, trebuie să dea zero. Dar în mişcarea pe prima din aceste porțiuni ne deplasăm într-un sens, iar pe cealaltă în sens opus. Dacă gândim contribuția pe AC ca un efect al deplasării într-un sens, iar pe cea de pe DB ca pe inversa contribuției de pe BD, constatăm că există

Figura 25

o mărime fizică a cărei valoare de la A la C trebuie să o contrabalanseze pe cea de la B la D. Această mărime constituie efectul asupra acțiunii a unui mic pas la dreapta, şi ea este la sfârşit (de la B la D) aceeaşi ca la început (de la A la C). Prin urmare, există o mărime fizică ce nu se modifică odată cu trecerea timpului, cu condiția ca principiul de minim să funcționeze şi principiul simetriei la translație să fie corect. Această mărime constantă (efectul unui mic pas lateral asupra acțiunii) este în fapt chiar impulsul, despre care am vorbit în ultima prelegere. Aceasta ne arată relația dintre simetrie şi conservare, în ipoteza că legile fizicii ascultă de un principiu de minimă acțiune. Se dovedeşte că ele chiar ascultă de un asemenea principiu, pentru că provin din mecanica cuantică. De-aia am spus că, în ultimă instanță, legătura între legile de simetrie şi legile de conservare provine din mecanica cuantică.

Pentru cazul translației în timp, o argumentare analoagă conduce la conservarea energiei. Simetria la rotația în spațiu se traduce prin conservarea momentului cinetic. Faptul că reflexia nu are efect asupra legilor fizicii nu ne oferă nimic simplu în context clasic. Lumea i-a zis paritate, şi există o lege numită „de conservare a parității", dar astea nu sunt decât nişte cuvinte complicate. Trebuie să menționez această lege, pentru că poate veți fi citit prin ziare că ea a fost dovedită ca fiind falsă. Ar fi fost mult mai uşor de înțeles dacă se scria acolo că s-a dovedit greşit principiul potrivit căruia nu se poate face distincție între stânga şi dreapta.

Dacă tot vorbesc de simetrii, un lucru pe care aş dori să vi-l spun este acela că există câteva noi probleme. De exemplu, pentru fiecare particulă avem o antiparticulă: pentru electron avem pozitronul, pentru proton avem antiprotonul, etc. În principiu, putem fabrica ceea ce noi numim antimaterie, în care fiecare atom să fie alcătuit din antipărțile lui constituente. Atomul de hidrogen reprezintă un proton şi un electron; dacă luăm un antiproton, care din punct de vedere electric este încărcat negativ, şi un pozitron, şi îi punem împreună, ei vor forma tot un fel de atom de hidrogen, mai exact un atom de antihidrogen. Nu au fost realizați în fapt atomi de antihidrogen, dar s-a considerat că în principiu ar fi posibil, şi că tot asfel s-ar putea produce toate felurile de antimaterie. Întrebarea pe care ne-am pune-o acum ar fi cea dacă antimateria funcționează sau nu la fel ca materia; şi, atât cât ştim noi, răspunsul este afirmativ. Una din legile de simetrie este aceea că dacă facem ceva din antimaterie, ar trebui să se comporte la fel ca şi când ar fi făcut din materie. Desigur, dacă cele două s-ar întâlni, s-ar anihila reciproc şi ar sări scântei.

S-a crezut dintotdeauna că materia şi antimateria au aceleaşi legi. Totuşi, acum că ştim faptul că simetria stânga-dreapta se arată a fi falsă, se naşte o întrebare importantă. Dacă se urmăreşte dezintegrarea unui neutron, dar de antimaterie – adică, un antineutron trece într-un antiproton, plus un antielectron (denumit şi pozitron), plus un neutrin – întrebarea este dacă aceasta se petrece la fel, în sensul că pozitronul rezultat prezintă torsiune spre stânga, sau dacă se întâmplă invers. Ultima noastră părere, în urmă cu câteva luni, era că dezintegrarea se face invers, şi că acolo unde materia (electronul) o ia la stânga, antimateria (pozitronul) o ia la dreapta. În acest caz, nu-i puteți explica efectiv marțianului care e dreapta şi care stânga, din cauză că dacă se întâmplă ca el să fie făcut din antimaterie, în momentul în care efectuează experimentul, electronii lui vor fi pozitronii, şi vor ieşi cu spinul pe dos. El va înțelege greşit unde este inima. Să presupunem că îi dați telefon şi îi explicați cum să fabrice un om; iar el o face, şi îi reuşeşte. Apoi îi explicați şi convențiile noastre sociale. În fine, după ce el vă spune cum să construiți o navă spațială suficient de performantă, vă urcați la bordul ei şi plecați să vă întâlniți cu acest om. Ajungeți la el, vă apropiați, şi întindeți mâna să dați noroc. Dacă el întinde mâna dreaptă, O.K.; însă dacă întinde stânga, atunci păzea... căci vă veți anihila reciproc!

Mi-ar plăcea să vă mai povestesc despre alte câteva simetrii, dar ele devin mult mai dificil de explicat. Mai există de asemenea nişte lucruri absolut remarcabile, şi anume aproape-simetriile. De exemplu, trăsătura remarcabilă a faptului că putem deosebi stânga de dreapta este aceea că putem face asta doar într-o măsură extrem de mică, pe baza respectivei dezintegrări beta. Ceea ce vrea să zică acest lucru este că, în proporție de 99,99 la sută, natura este nediferențiată în raport cu reflexia, dar că există un mic element, doar un mic fenomen caracteristic, care este complet diferit, în sensul că este absolut unilateral. Acest fapt constituie un mister în legătură cu care nimeni nu are încă nici cea mai vagă idee.

5 DISTINCȚIA ÎNTRE TRECUT ŞI VIITOR

Este evident pentru oricine că fenomenele lumii sunt în mod categoric ireversibile. Vreau să spun că lucrurile se întâmplă intr-un fel, nu şi invers. Scăpaţi pe jos o ceaşcă şi ea se sparge, şi puteţi sta şi aştepta cât vreţi ca cioburile să se unească la loc şi să vă sară înapoi în mână. Dacă priviţi valurile spărgându-se de ţărm, puteţi sta şi aştepta cât vreţi momentul măreţ în care spuma mării să se adune în aer şi să se prăvălească în larg – ar fi foarte fain!

Demonstrarea acestui fapt în cadrul prelegerilor se face de obicei proiectând de la coadă la cap o secvenţă de film în care sunt prezentate un număr de fenomene, şi aşteptând apoi râsete din public. Râsetele înseamnă pur şi simplu că aşa ceva nu se întâmplă în lumea reală. Dar propriu-zis acesta este un mod facil de a exprima ceva atât de evident şi de profund precum diferenţa între trecut şi viitor; căci chiar şi fără vreun experiment, înseşi trăirile noastre interioare sunt complet diferite în ceea ce priveşte trecutul şi viitorul. Trecutul ni-l amintim, viitorul nu. Avem un alt fel de conştienţă în legătură cu ceea ce s-ar putea întâmpla, decât avem în legătură cu ceea ce este posibil să se fi întâmplat. Din punct de vedere psihologic, trecutul şi viitorul arată complet diferit, implicând concepte precum amintirile şi liberul-arbitru, în sensul că avem senzaţia că putem face ceva care să ne afecteze viitorul, dar că toţi dintre noi, sau majoritatea noastră, credem că nu putem face nimic care să ne afecteze trecutul. Remuşcare, regret, speranţă, toate sunt cuvinte care diferenţiază în mod absolut evident trecutul de viitor.

Acuma, dacă lumea din jurul nostru este făcută din atomi, şi dacă noi suntem făcuţi tot din atomi, iar aceştia ascultă de legile fizicii, înseamnă că modul cel mai evident de a interpreta această distincţie clară între trecut şi viitor, această ireversibilitate a fenomenelor, ar fi acela că unele legi, anumite legi de mişcare ale atomilor, se desfăşoară într-un sens dat – că legile atomilor

nu sunt astfel încât să se poată desfăşura în ambele sensuri. Undeva în cadrul angrenajului ar trebui să existe un soi de principiu de genul că din zig nu poate să rezulte decât zag, şi niciodată viceversa, şi că astfel lumea îşi schimbă tot timpul aspectul ei zigat în cel zagat – iar treaba aceasta ireversibilă a interacţiunilor lucrurilor ar trebui să fie chestia care face ca toate fenomenele să ni se pară că se desfăşoară într-un singur sens.

Însă nu am descoperit încă aşa ceva. Adică, în toate legile fizicii pe care le-am aflat până acum, nu pare să existe vreo deosebire între trecut şi viitor. Secvenţa de film ar trebui să funcţioneze la fel în ambele sensuri, iar fizicianul care o urmăreşte n-ar trebui să râdă.

Să considerăm Legea Atracţiei Universale ca exemplul nostru standard. Dacă avem un soare şi o planetă căreia îi dăm drumul pe o direcţie oarecare să se rotească în jurul acestuia, ce se întâmplă dacă o filmăm şi proiectăm secvenţa de la coadă la cap? Planeta se învârteşte în jurul soarelui în sens opus, desigur, şi se menţine pe o elipsă. Viteza ei este astfel încât ariile măturate de raza vectoare în intervale de timp egale să fie totdeauna egale. În fapt, se deplasează exact aşa cum ar fi normal. Nu se poate face distincţie între deplasarea aceasta şi cea în celălalt sens. Deci Legea Atracţiei Universale este de aşa natură încât direcţia nu contează; dacă prezentaţi într-un film proiectat de la coadă la cap orice fenomen care implică doar gravitaţie, el va arăta absolut firesc. O exprimare mai exactă a acestui aspect este următoarea: dacă s-ar inversa brusc vitezele tuturor particulelor unui sistem mai complex, sistemul respectiv pur şi simplu ar reveni succesiv prin toate stările prin care a trecut. Dacă avem o sumedenie de particule care fac ceva, şi le inversăm brusc vitezele, ele vor desface tot ceea ce au întreprins.

Acest fapt este conţinut în Legea Atracţiei Universale, care afirmă că vitezele se schimbă ca rezultat al acţiunii forţelor. Dacă inversăm sensul timpului, forţele nu se schimbă, şi, ca atare, modificările de viteză nu sunt alterate la distanţele respective. Deci, fiecare viteză suferă astfel o serie de variaţii în ordinea exact inversă ca mai înainte, şi este uşor de demonstrat că Legea Atracţiei Universale este reversibilă în timp.

Legile electricităţii şi magnetismului? Reversibile în timp. Legile interacţiunilor nucleare? Atât cât ştim noi, reversibile în timp. Legile dezintegrării beta, despre care am vorbit data trecută? Tot reversibile în timp? Dificultatea experimentelor efectuate în urmă cu câteva luni, care indică faptul că acolo se întâmplă ceva necunoscut în legătură cu legile, sugerează posibilitatea ca în fapt dezintegrarea beta să nu fie la rândul ei reversibilă în timp. Va trebui să mai aşteptăm alte experimente pentru a ne pronunţa. Însă un lucru cel

puțin este adevărat: dezintegrarea beta (așa cum o fi fiind ea, reversibilă în timp sau nu) reprezintă un fenomen foarte neînsemnat pentru majoritatea situațiilor obișnuite. Posibilitatea ca eu să mă adresez acum dumneavoastră nu depinde de dezintegrarea beta, deși depinde de interacțiunile chimice, de forțele electrice, nu prea mult pentru moment de forțele nucleare, și mai depinde de gravitație. Eu mă manifest unilateral – vorbesc, și vocea se emite în aer, și nu se absoarbe înapoi când deschid gura – iar această ireversibilitate nu poate fi pusă pe seama dezintegrării beta. Cu alte cuvinte, bănuim că majoritatea fenomenelor obișnuite din lume, fiind generate de mișcarea atomilor, ascultă de legi ce pot fi complet date înapoi. Deci, pentru a afla explicația ireversibilității, va trebui să ne continuăm studiul.

Dacă urmărim ceva mai atent mișcarea planetelor sistemului nostru în jurul Soarelui, descoperim imediat că lucrurile nu stau chiar perfect. De exemplu, rotația Pământului în jurul axei sale încetinește lent. Aceasta se datorează frecărilor mareice, și vă dați seama că frecarea reprezintă ceva evident ireversibil. Dacă am un corp greu pe podea și îl împing, el va aluneca, după care se va opri. Dacă stau să aștept, el nu va porni brusc să accelereze înspre mâna mea. Deci efectul fricțiunii pare a fi ireversibil. Însă, așa după cum am discutat cu o altă ocazie, frecarea reprezintă efectul complexității enorme a interacțiunilor obiectului cu dușumeaua, a vibrației atomilor din interior. Mișcarea ordonată a atomilor corpului este transformată în mișcare dezordonată, tresăriri neregulate ale atomilor lemnului. Ca atare, ar trebui să privim situația mai în amănunt.

De fapt, avem aici cheia evidentei ireversibilități. Voi lua un exemplu simplu. Să presupunem că într-un vas avem apă colorată cu cerneală și apă curată, separate între ele printr-un perete. Înlăturăm cu precauție peretele despărțitor și așteptăm o vreme. Apa, care la început este albă într-o parte și albastră în cealaltă, începe să se amestece și după un timp devine „albăstruie", oarecum semicolorată în mod uniform. Acuma, dacă stăm și așteptăm vreme îndelungată, nu o vom vedea separându-se iar. (Ați putea *face dumneavoastră* ceva pentru a separa culoarea. Ați putea evapora apa și condensa-o în altă parte, apoi strânge cerneala și dizolva-o din nou în jumătate de apă, așa ca la început. Însă în timp ce ați face toate acestea, dumneavoastră înșivă ați cauza fenomene ireversibile în altă parte.) De la sine ea nu va reveni la starea inițială.

Acest lucru ne oferă un oarecare indiciu: să urmărim ce fac moleculele. Să presupunem că filmăm apa curată amestecându-se cu cea albastră. Dacă

am proiecta filmul de la coadă la cap, ar arăta ciudat, căci am porni de la ceva colorat în mod uniform, şi treptat apa s-ar separa – ar fi, în mod evident, o aiureală. Acum să mărim imaginea, astfel încât orice fizician să poată descoperi, urmărind atom cu atom, ce anume se întâmplă în mod ireversibil – unde exact cedează legile echilibrului dintre înainte şi înapoi. Pornim filmul şi privim imaginile. Avem atomi de două feluri (este ridicol, dar haideţi să-i numim albaştri şi albi) care tremură tot timpul datorită agitaţiei termice. La început, într-o parte avem în majoritate atomi de un fel, iar în partea opusă atomi de celălalt fel. Ei vibrează cu miliardele şi observăm că, pe parcursul mişcărilor lor neregulate perpetue, ajung din starea în care erau complet separaţi, cei de-un fel într-o parte şi cei de celălalt fel în partea opusă, ajung aşadar în starea în care sunt complet amestecaţi, aceasta făcând ca apa să fie mai mult sau mai puţin uniform albastră.

Să urmărim o ciocnire oarecare din cele imortalizate pe peliculă, în care atomii se apropie cumva unii de alţii, după care ricoşează. Daţi porţiunea de film înapoi şi obţineţi moleculele respective apropiindu-se din sens invers şi ricoşând pe direcţia iniţială. Iar fizicianul se uită cu ochii lui scrutători, şi măsoară totul, şi rosteşte: „Este în regulă, se petrece conform legilor fizicii. Dacă două molecule se apropie în acest fel, atunci modul lor de a ricoşa este corect.“ Este ceva reversibil. Legile ciocnirilor moleculare sunt reversibile.

Deci, dacă priviţi prea atent, nu puteţi înţelege deloc treaba, din cauză că oricare din ciocniri este absolut reversibilă; şi totuşi, filmul în întregime înfăţişează ceva absurd, şi anume faptul că moleculele pornesc din starea amestecată – albastru, alb, albastru, alb, albastru, alb – şi, pe măsura trecerii timpului, prin intermediul ciocnirilor, ajung să se separe unele de altele. Dar nu se poate să facă aşa ceva: este nefiresc ca accidentele vieţii să fie astfel încât moleculele albastre să se separe de cele albe. Şi totuşi, dacă priviţi foarte atent acel film dat înapoi, fiecare ciocnire este O.K.

Ei bine, pricepeţi acum că tot ce ţine de ireversibilitate se datorează accidentelor generale ale vieţii. Dacă porniţi de la ceva separat şi efectuaţi schimbări neregulate, acel ceva devine mai uniform. Dar dacă porniţi cu el uniform şi procedaţi la schimbări neregulate, el nu se separă. *S-ar putea* separa. Legile fizicii nu interzic ca moleculele să ricoşeze astfel încât să se separe. Doar că este improbabil. Nu s-ar întâmpla nici într-un milion de ani. Iar acesta este răspunsul. Lucrurile sunt ireversibile doar în sensul că este de aşteptat ca ele să se desfăşoare într-un anumit fel, pe când în alt fel, chiar dacă este posibil şi respectă legile fizicii, nu se vor desfăşura nici într-un milion de ani. Pur şi simplu este ridicol să ne închipuim că dacă stăm şi

aşteptăm suficient de mult timp, tremurul atomilor va separa un amestec uniform de apă şi cerneală într-o parte de apă şi o parte de cerneală.

Acuma, dacă în experimentul meu înconjur cu o cutie doar patru-cinci molecule din fiecare tip, cu timpul ele se vor amesteca. Însă cred că puteţi accepta faptul că, dacă urmăriţi mai departe ciocnirile perpetuu neregulate ale acestora, atunci, după un anumit timp – nu neapărat un milion de ani, poate doar un an – veţi vedea că, în mod accidental, ele vor ajunge mai mult sau mai puţin în starea iniţială, cel puţin în sensul că dacă pun un perete despărţitor la mijloc, toate cele albe se vor găsi de o parte a lui, iar toate cele albastre de partea cealaltă. Nu este imposibil. Totuşi, corpurile propriu-zise cu care operăm nu au doar patru-cinci molecule albe şi albastre. Ele au patru-cinci milioane de milioane de milioane de milioane, care toate ar fi separate la fel. Deci vizibila ireversibilitate a naturii nu provine din ireversibilitatea legilor fundamentale ale fizicii; ea provine din faptul că dacă plecăm de la un sistem ordonat, şi se manifestă neregularităţile naturii, ţopăiturile moleculelor, atunci lucrul acela evoluează într-un fel dat.

Ca atare, următoarea întrebare este: cum oare au ajuns lucrurile ordonate în primă instanţă? Adică, de ce oare este posibil să se plece de la ceva ordonat? Dificultatea este că începem cu ceva care este ordonat, şi terminăm cu ceva care nu este ordonat. Una din regulile lumii este aceea că lucrurile evoluează dintr-o stare ordonată spre una dezordonată. Întâmplător, cuvântul acesta, ordine, la fel ca şi cuvântul dezordine, reprezintă alţi termeni din fizică ce nu au exact acelaşi înţeles ca în viaţa obişnuită. Ordinea nu trebuie neapărat să fie interesantă din perspectiva unei fiinţe omeneşti, ci pur şi simplu este vorba de nişte situaţii bine definite – toate particulele de un fel într-o parte şi toate de celălalt fel în alta, sau toate particulele amestecate – pe care convenim să le numim ordine şi respectiv dezordine.

Aşadar, întrebarea este cum ajunge ordonat acel lucru în primă instanţă, şi din ce motiv, atunci când privim orice situaţie obişnuită, care este doar parţial ordonată, putem conchide că probabil ea provine din una mai ordonată? Dacă voi privi un vas în care apa are culoarea albastru-închis într-o parte, este foarte limpede în partea cealaltă, şi are o tentă albăstruie la mijloc, şi dacă voi şti că el a fost lăsat să stea liniştit în ultimele douzeci-treizeci de minute, voi bănui că acesta a ajuns astfel din cauză că în trecut separarea a fost mai accentuată. Dacă voi mai aştepta în continuare, albastrul şi albul se vor întrepătrunde şi mai mult, şi, cunoscând că obiectul acela a fost lăsat în pace un timp suficient de lung, voi putea concluziona ceva despre starea lui din trecut. Faptul că extremităţile sunt „nete“ nu se poate explica decât prin

aceea că în trecut separarea a fost mult mai pregnantă; dacă nu ar fi fost aşa, în timpul scurs de atunci amestecarea s-ar fi făcut mai bine. Prin urmare, din prezent este posibil de spus ceva despre trecut.

În fapt, fizicienii arareori procedează aşa. Lor le place să creadă că nu trebuie decât să întrebi: „acestea fiind condiţiile iniţiale, ce se va întâmpla în continuare?“ În schimb, toate ştiinţele noastre surori pun problema cu totul diferit; de fapt, toate celelalte lucruri studiate – istoria, geologia, paleoastronomia – au o problemă de acest gen aparte. Eu găsesc că ele sunt în măsură să facă predicţii de un cu totul alt fel decât cele făcute de fizică. Fizicianul spune: „în condiţiile date, vă voi spune ce urmează să se întâmple“. Însă geologul afirmă ceva de genul: „am săpat în pământ şi am găsit un anume tip de oase; prevăd că dacă veţi săpa şi dumneavoastră, veţi găsi un tip asemănător de oase“. Istoricul, deşi vorbeşte despre trecut, o poate face vorbind despre viitor. Atunci când spune că Revoluţia Franceză a avut loc în anul 1789, el înţelege prin aceasta că dacă veţi căuta în altă carte despre Revoluţia Franceză, veţi găsi aceeaşi dată. Ceea ce face el este să emită un gen de predicţie despre ceva ce nu a mai fost investigat înainte, despre documente care încă urmează a fi cercetate. El prezice că documentele în care se pomeneşte despre Napoleon vor coincide cu ceea ce este scris în celelalte documente. Întrebarea este cum de se poate acest lucru, iar singura explicaţie este de a se sugera că, în acest sens, trecutul lumii a fost mai organizat decât prezentul.

Unii au avansat ideea că maniera în care lumea a devenit ordonată este următoarea. La început, întregul Univers nu era decât mişcări neregulate, precum apa amestecată cu cerneală. Am văzut că dacă aşteptaţi suficient de mult timp, în cazul a foarte puţini atomi, apa se poate separa din întâmplare. Unii fizicieni (acum un secol) au sugerat că tot ceea ce s-a întâmplat a fost că lumea, acest sistem care tot evoluează şi evoluează, a fluctuat. (Acesta este termenul folosit pentru a exprima devierea uşoară de la condiţiile uniforme obişnuite.) Lumea a fluctuat, iar în clipa de faţă noi suntem martorii revenirii ei la situaţia de dinainte. S-ar putea să spuneţi: „Bine, dar ia uite cât de mult timp a trebuit aşteptat pentru o asemenea fluctuaţie.“ Ştiu asta, însă dacă lumea nu ar fi fluctuat suficient de mult pentru a putea da naştere evoluţiei, pentru a fi în stare să producă o fiinţă înzestrată cu inteligenţă, atunci noi nu am mai fi fost aici să observăm asta. Deci, pentru a o putea sesiza, trebuia aşteptat până să prindem noi viaţă; fluctuaţia trebuia să fie cel puţin atât de mare. Eu însă cred că această teorie este incorectă. Motivul

pentru care cred că ea este ridicolă este următorul. Dacă lumea este mult mai mare, iar dacă atomii sunt răspândiţi peste tot, atunci, dacă s-ar întâmpla ca, pornind dintr-o stare a ei complet amestecată, să privesc doar atomii dintr-o regiune şi să descopăr că aceştia sunt separaţi, eu n-aş avea nici un motiv să concluzionez că ei ar fi separaţi peste tot. În fapt, dacă ar fi vorba de o fluctuaţie, şi dacă aş sesiza ceva ciudat, cea mai probabilă explicaţie pentru acel lucru ar fi că oriunde în rest nu este nimic ciudat. Vreau să spun că, pentru a fi făcut o astfel de observaţie deosebită, ar fi trebuit să îmi surâdă norocul; iar norocul nu râde cu gura până la urechi. În cazul experimentului cu apa colorată, atunci când puţinele molecule din cutie ar fi fost eventual separate, cea mai probabilă situaţie în restul apei ar fi fost ca ea să fie în continuare amestecată. Ca atare, deşi atunci când privim stelele şi lumea vedem că totul este ordonat, predicţia ar fi că, dacă am privi undeva unde încă nu ne-am uitat, am observa că acolo este o harababură şi un talmeş-balmeş. Dacă separarea materiei sub formă de stele – care sunt fierbinţi – şi respectiv sub formă de spaţiu – care este rece – ar reprezenta, aşa cum am spus, o fluctuaţie, atunci ne-am aştepta ca, în locurile în care nu am căutat, să descoperim că stelele nu s-au separat de spaţiu. Or, cum noi preconizăm totdeauna că acolo unde încă nu ne-am uitat vom găsi stele în condiţii similare, sau aceleaşi afirmaţii despre Napoleon, sau oase asemenea celor pe care le-am mai văzut, înseamnă că succesul tuturor acestor ştiinţe constituie un indiciu asupra faptului că lumea nu provine dintr-o fluctuaţie, ci dintr-o stare trecută de separare mai pregnantă, dintr-o stare de ordine mai mare decât cea prezentă. Ca atare, eu cred că este necesar ca legilor fizicii să li se adauge ipoteza potrivit căreia în trecut Universul a fost, în sens tehnic, mai ordonat decât astăzi; consider că aceasta este afirmaţia suplimentară necesară pentru a da sens şi înţelegere noţiunii de ireversibilitate.

Desigur, acest enunţ este el însuşi, la rândul său, unilateral în raport cu trecerea timpului. El afirmă că ceva privitor la trecut diferă faţă de viitor. Însă el nu se înscrie în domeniul a ceea ce numim în mod obişnuit legile fizicii, deoarece actualmente noi încercăm să facem distincţie între enunţurile legilor fizicii, care impun regulile evoluţiei Universului, şi legile ce decretează starea în care lumea s-a aflat în trecut. Acestea din urmă sunt considerate a constitui paleoastronomia; poate că într-o bună zi vor face şi ele parte din legile fizicii.

Acuma, există o serie de trăsături interesante în legătură cu ireversibilitatea, pe care aş dori să vi le descriu. Una dintre ele constă în a urmări cum

funcţionează propriu-zis un mecanism ireversibil. Să presupunem că punem la punct ceva despre care ştim că ar trebui să funcţioneze doar într-un singur sens. Îmi propun să construiesc un mecanism cu clichet: un disc de fierăstrău circular, cu dinţi înclinaţi abrupt la urcare şi relativ lini la coborâre. Roata este fixată pe un ax, iar pe un pivot este montat un opritor, tras în jos prin intermediul unui arc (fig. 26).

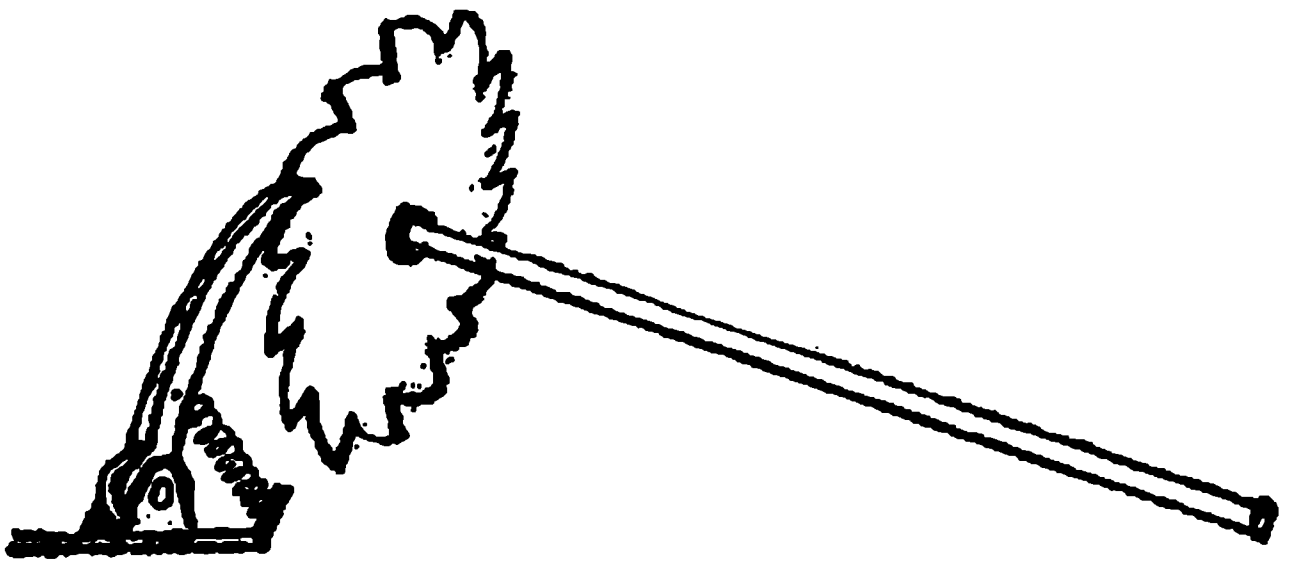


Figura 26

Acuma, roata se poate învârti numai într-o singură parte. Dacă încercaţi să o răsuciţi în partea cealaltă, marginile ridicate ale dinţilor se blochează în opritor şi nu merge. În schimb, dacă o învârtiţi în sensul normal, opritorul pur şi simplu sare peste dinţi – ţac, ţac, ţac. (Aţi văzut aşa ceva la ceasuri: acestea au în interior un astfel de mecanism care vă permite să le remontaţi într-un singur sens, şi care împiedică revenirea butonului după ce l-aţi întors.) Dispozitivul este absolut ireversibil, în sensul că se poate roti numai într-o singură direcţie.

Acuma, ne propunem să folosim acest mecanism ireversibil, această roată care se poate învârti doar într-o singură parte, într-un scop foarte interesant şi util. Aşa cum ştiţi, există o mişcare perpetuă şi neregulată a moleculelor, iar dacă realizaţi un instrument extrem de sensibil, acesta va trepida tot timpul sub acţiunea bombardamentului neregulat al moleculelor de aer din jurul său. Ei bine, vom face o chestie şmecheră: vom ataşa axului roţii patru palete, uite aşa (fig. 27).

Paletele se găsesc într-o incintă cu gaz, şi sunt bombardate permanent de moleculele acestuia, în mod neregulat, fiind împinse când într-o parte, când în cealaltă. Însă atunci când paletele sunt împinse într-o parte, dispozitivul este blocat de către opritor, pe când, atunci când sunt împinse în partea cealaltă, el se roteşte. Avem deci un fel de mişcare perpetuă, cu roata învârtindu-se la nesfârşit. Şi asta pentru că dispozitivul cu clichet este ireversibil.

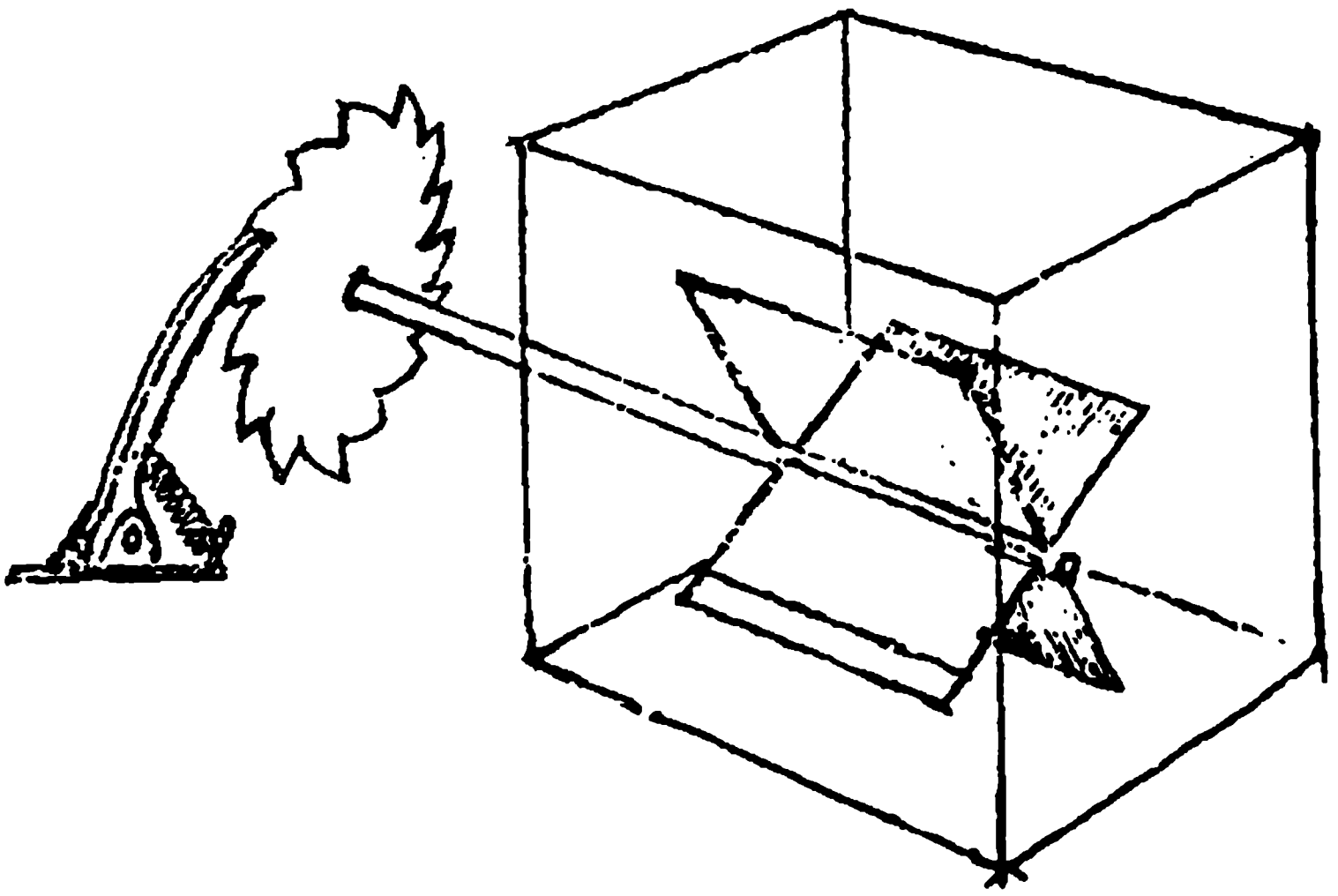


Figura 27

Dar, de fapt, trebuie să privim lucrurile mai în detaliu. Modul în care funcţionează mecanismul este de a ridica opritorul şi de a-l lăsa să cadă înapoi pe următorul dinte. Atunci, dacă ciocnirea este perfect elastică, el ricoşează, iar şi iar, şi se poate pur şi simplu întâmpla ca roata să se învârtă în sens opus. Deci, funcţionarea ireversibilă nu este adevărată decât dacă se admite că la ciocnirea cu dintele, opritorul fie rămâne lipit de acesta, fie ricoşează atenuat. Dacă ricoşează atenuat, se produce ceea ce numim amortizare, sau fricţiune. Ca urmare, în cazul în care el rămâne pe dinte sau ricoşează atenuat – unicul mod în care dispozitivul va funcţiona într-un singur sens – se generează căldură prin intermediul fricţiunii, iar roata devine tot mai fierbinte. Totuşi, atunci când ea se încălzeşte extrem de mult, se mai întâmplă ceva. Exact aşa cum în gaz există mişcare browniană, dezordonată, tot la fel părţile care alcătuiesc roata şi paletele, indiferent din ce material ar fi făcute, încep să se mişte într-o manieră tot mai neregulată, pe măsură ce se încing. Se ajunge ca la un moment dat roata să fie atât de fierbinte, încât opritorul pur şi simplu să tresalte din cauza mişcărilor moleculare ale chestiilor din interiorul său; astfel, săriturile acestuia au aceeaşi cauză ca şi rotirea paletelor. Din acest motiv, şansele ca dinţii să înainteze în oricare din cele două direcţii sunt egale. Nu mai avem de-a face cu un dispozitiv ireversibil. De fapt, el chiar poate fi dat înapoi! Dacă roata este fierbinte şi partea cu paletele este rece, mecanismul despre care credeaţi că ar trebui să meargă într-un sens, merge în celălalt, căci de fiecare dată când opritorul cade pe dinţi, el apasă asupra unui profil

înclinat, împingând roata „înapoi". Apoi sare din nou, cade pe alt plan înclinat, şi aşa mai departe. Aşadar, dacă roata este mai fierbinte decât incinta, ea se învârteşte în sensul greşit.

Ce legătură au toate acestea cu temperatura gazului din jurul paletelor? Să presupunem că n-am avea deloc această porţiune. Atunci, dacă roata este împinsă de opritorul ce cade pe planul înclinat, ceea ce ar urma să se întâmple ar fi ca profilul vertical al dintelui următor să se ciocnească de opritor şi roata să ricoşeze înapoi. Pentru a împiedica acest lucru, montăm un amortizor în capătul opritorului şi fixăm pe tija roţii paletele respective, care, din cauza aerului din jurul lor, o încetinesc pe aceasta, nelăsând-o să se mişte liber. Astfel, ea se va roti într-un singur sens, cel greşit. Deci, se dovedeşte că indiferent cum l-aţi proiecta, un astfel de dispozitiv va merge într-un sens dacă o parte a lui este mai fierbinte decât cealaltă, şi în sens opus în cazul contrar. Însă, după ce are loc un schimb de căldură între cele două părţi şi totul se linişteşte, astfel încât paletele şi roata să ajungă la aceeaşi temperatură, în medie nu va exista nici un sens privilegiat de funcţionare. Aceasta este maniera tehnică în care fenomenele naturii se desfăşoară într-un singur sens atâta timp cât ele sunt departe de echilibru, atâta timp cât o parte este mai liniştită decât cealaltă, mai albastră decât cealaltă.

Conservarea energiei ne-ar putea face să credem că dispunem de oricât de multă energie dorim. În natură nu se pierde şi nu se câştigă niciodată energie. Şi totuşi, energia mării, de exemplu, agitaţia termică a tuturor atomilor din ocean, ne este indisponibilă. Pentru a ordona această energie, pentru a o domestici, a o face utilizabilă, avem nevoie de o diferenţă de temperatură; căci, altfel, vom descoperi că deşi energia este acolo, noi nu o putem folosi. Este o mare diferenţă între energie şi disponibilitatea ei. Energia mării există în cantitate mare, dar nu ne este disponibilă.

Conservarea energiei înseamnă că energia totală din lume este menţinută constantă. Însă prin intermediul vibraţiilor neregulate, ea poate fi răspândită atât de uniform încât, în anumite circumstanţe, să nu mai fie posibilă deplasarea ei în nici o parte, să nu mai existe nici un control asupra ei.

Cred că vă pot oferi o analogie prin care să vă faceţi o idee asupra dificultăţilor implicate în felul acesta. Nu ştiu dacă aţi trăit vreodată experienţa – eu am trăit-o – de a vă afla pe plajă cu câteva prosoape la îndemână, şi de a începe brusc o ploaie torenţială. Vă luaţi prosoapele şi fugiţi cât puteţi de repede la cabine. Apoi începeţi să vă ştergeţi, şi observaţi că prosoapele sunt

un pic ude, dar sunt mai uscate decât dumneavoastră. Vă tot ştergeţi cu unul din ele, până când descoperiţi că e prea ud – vă udă tot atât de mult cât vă şi şterge – şi luaţi altul. Curând constataţi un lucru groaznic: toate prosoapele sunt umede, şi la fel sunteţi şi dumneavoastă. Nu aveţi cum să vă uscaţi mai mult, chiar dacă aveţi la dispoziţie multe prosoape, deoarece, într-un anumit sens, nu există nici o diferenţă între umiditatea lor şi a dumneavoastră. Aş putea inventa un soi de mărime fizică pe care să o numesc „uşurinţa de a îndepărta apa". Prosopul are aceeaşi uşurinţă de a îndepărta apa de pe el ca şi dumneavoastră, deci atunci când veniţi în contact cu el, câtă apă trece de la el la dumneavoastră, tot atâta trece şi de la dumneavoastră la el. Asta nu înseamnă că pe prosop există aceeaşi cantitate de apă ca şi pe dumneavoastră – un prosop mare va absorbi mai multă apă decât un prosop mic – ci că amândoi aveţi aceeaşi umiditate. Atunci când lucrurile ajung la aceeaşi umiditate, nu mai este nimic de făcut.

Acuma, apa este precum energia, căci cantitaea ei totală nu se schimbă. (Dacă uşa cabinei este deschisă şi puteţi ieşi la soare să vă uscaţi, sau dacă găsiţi un alt prosop uscat, atunci sunteţi salvaţi; dar să presupunem că totul este închis şi că tot ce aveţi la îndemână nu sunt decât acele prosoape.) În mod identic, dacă vă imaginaţi o parte de lume care este izolată, şi aşteptaţi suficient de mult, atunci, în urma accidentelor lumii, energia, asemenea apei, se va răspândi uniform peste tot, până când din unidirecţionalitatea desfăşurării fenomenelor nu va mai rămâne nimic cu adevărat interesant referitor la modul în care percepem noi lumea.

Ca atare, în cazul clichetului, opritorului şi paletelor, care constituie o situaţie bine delimitată, în care nimic altceva nu este implicat, temperaturile se egalează treptat în cele două părţi, şi roata nu se mai învârteşte în nici un sens. În aceeaşi manieră, dacă lăsaţi în pace suficient de mult timp orice sistem, energia lui se amestecă atât de tare, încât nici un pic din ea nu mai rămâne efectiv disponibilă pentru a face ceva.

Întâmplător, lucrul care corespunde umidităţii, „uşurinţei de a îndepărta apa", se numeşte temperatură. Deşi eu spun că, atunci când două lucruri se află la aceeaşi temperatură, ele sunt în echilibru, asta nu înseamnă că au aceeaşi energie; înseamnă doar că este tot atât de uşor să preiei energie de la oricare din ele. Temperatura reprezintă ceva de genul „uşurinţei de a îndepărta energia". Deci, dacă le puneţi în contact unul cu altul, nu se întâmplă nimic în mod vizibil: ele îşi trec energie unul altuia în mod egal, iar rezultatul net este zero. Atunci când toate lucrurile vor fi dobândit aceeaşi temperatură, nu va mai fi rămas nici un pic de energie disponibilă pentru ceva. Principiul

ireversibilității afirmă că, dacă lucrurile se află la temperaturi diferite şi sunt lăsate în voia lor, atunci, pe măsura trecerii timpului, ele se apropie din ce în ce mai mult de o aceeaşi temperatură, iar energia disponibilă scade continuu.

Aceasta reprezintă o altă exprimare a ceea ce noi numim Legea Entropiei,* care afirmă că entropia creşte mereu. Dar nu vă cramponaţi de cuvinte: enunţată altfel, ea vrea să zică de fapt că disponibilitatea de energie scade mereu. Iar aceasta constituie o caracteristică a lumii, în sensul că se datorează haosului mişcărilor moleculare neregulate. Lucrurile cu temperaturi diferite, lăsate în voia lor, tind să ajungă la echilibru termic. Dacă aveţi două lucruri la aceeaşi temperatură, cum ar fi apa pusă pe un aragaz obişnuit al cărui foc nu este aprins, apa nu va îngheţa şi plita nu se va încinge. Dar dacă aveţi gheaţă pusă pe o plită încinsă, lucrurile vor evolua în celălalt sens. Aşadar, unidirecţionalitatea fenomenelor se manifestă totdeauna în sensul scăderii disponibilităţii de energie.

Este tot ceea ce am de spus pe această temă, însă vreau să fac câteva remarci în legătură cu anumite caracteristici. Avem aici un exemplu în care un efect evident, ireversibilitatea, nu este o consecinţă evidentă a legilor, ci, în fapt, se situează departe de legile de bază. Este nevoie de multă analiză pentru a înţelege motivul apariţiei lui. Efectul este de primă importanţă în economia lumii, în comportarea reală a lumii, în toate lucrurile evidente. Memoria mea, trăsăturile mele, diferenţa dintre trecut şi viitor, toate sunt profund implicate în cadrul acestui efect; şi totuşi, înţelegerea lui pe baza cunoaşterii legilor nu ne este la îndemână din prima. Este nevoie de multă analiză.

Se întâmplă adesea ca legile fizicii să nu aibă o relevanţă directă evidentă asupra trăirilor, ci să constituie, într-o mai mare sau mai mică măsură, o abstracţiune. În acest caz particular, faptul că legile sunt reversibile deşi fenomenele nu sunt, reprezintă un exemplu.

Există adesea distanţe mari între legile detaliate şi aspectele principale ale fenomenelor reale. De exemplu, dacă priviţi o banchiză de gheaţă în tot ansamblul ei, şi urmăriţi cum fragmente masive se prăbuşesc în apă, şi modul în care gheaţa se mişcă, şi aşa mai departe, nu este cu adevărat esenţial să vă aduceţi aminte că ea este făcută din mici cristale de gheaţă hexagonale. Şi totuşi, dacă este înţeleasă suficient de bine, mişcarea unui gheţar reprezintă

* Principiul al Doilea al termodinamicii. (n.t.)

în fapt o consecință a caracteristicilor cristalelor hexagonale de gheață. Însă înțelegerea întregii comportări a gheţarului ia extrem de mult timp (şi, de fapt, nimeni nu ştie încă suficiente lucruri despre gheaţă, indiferent cât de mult a studiat cristalele). Totuşi, credința este că dacă înțelegem cristalul de gheață, înțelegem în ultimă instanță gheţarul.

În fapt, deşi pe parcursul acestor prelegeri am discutat despre fundamentele legilor fizicii, trebuie să spun numaidecât că, din cunoaşterea tuturor legilor fundamentale aşa cum le ştim noi astăzi, nu se poate obţine o înţelegere imediată a prea mare lucru. Durează ceva, şi chiar şi atunci este doar o înţelegere parţială. Natura pare a fi de fapt construită astfel încât cele mai importante lucruri din lumea reală să apară ca un soi de rezultat accidental, complicat, al multor legi.

Să luăm drept exemplu nucleele. Acestea implică mai multe particule nucleare, protoni şi neutroni, şi sunt foarte complexe. Ele prezintă ceea ce noi numim niveluri energetice: se pot afla în stări diferite din punct de vedere al valorilor energiei, iar diferitele nuclee au diferite niveluri energetice. Aflarea poziţiilor nivelurilor energetice este o problemă complicată, pe care o putem rezolva doar parţial. Poziționarea exactă a acestora reprezintă, în mod evident, consecința unei complexități enorme; dar, în esență, faptul că azotul, care are nucleul alcătuit din 15 particule, se întâmplă să prezinte un nivel energetic cu valoarea de 2,4 milioane de electronvolți, un altul de 7,1 milioane şi aşa mai departe, nu constituie în vreun fel un mister. Totuşi, lucrul remarcabil în legătură cu natura este faptul că întregul Univers, în caracteristica sa, depinde de exact poziția unui nivel anume a unui nucleu anume. Se întâmplă că în cadrul nucleului de carbon12 există un nivel cu valoarea de 7,82 milioane de electronvolți. Iar acest fapt face toată diferența.

Situaţia se prezintă în felul următor. Se porneşte de la hidrogen – este vădit că la început lumea era toată numai hidrogen – care se adună sub acțiunea gravitației şi se încălzeşte; se pot iniția în acest fel reacţii nucleare, în urma cărora să apară heliul; heliul se poate apoi combina doar parțial cu hidrogenul, pentru a forma câteva alte elemente chimice, puțin mai grele. Însă acestea se dezintegrează imediat înapoi în heliu. Ca atare, a existat o vreme un mare mister în legătură cu proveniența celorlalte elemente chimice din lume, căci, pornind de la hidrogen, procesele din cuptoarele stelare nu ar fi generat decât heliu şi ca la o jumătate de duzină de alte elemente. Confruntați cu această problemă, profesorii Hoyle şi Salpeter* au afirmat că există o

* Fred Hoyle, astronom britanic de la Cambridge. Edwin Salpeter, fizician american de la Cornell University.

soluție. Dacă trei atomi de heliu s-ar putea uni pentru a forma un carbon, am putea calcula rata cu care această reacție s-ar produce într-o stea. Şi se dovedeşte că ea n-ar putea să se producă niciodată, cu excepția unui singur posibil accident: dacă s-ar întâmpla să existe în atomul de carbon un nivel energetic de 7,82 milioane de electronvolți. În această situație, cei trei atomi de heliu s-ar uni şi, mai înainte ca ei să se despartă, ar rămâne în medie împreună ceva mai mult timp decât ar face-o altfel. Iar acest un pic mai mult ar fi suficient pentru a se mai întâmpla ceva: producerea altor elemente. Dacă în atomul de carbon ar exista un nivel de 7,82 milioane de electronvolți, am putea înțelege de unde provin celelalte elemente din tabelul periodic. Şi astfel, printr-o argumentare pe dos, de la concluzie la ipoteză, s-a prezis existența unui nivel de 7,82 milioane de electronvolți în atomul de carbon; iar experimentele de laborator au arătat că într-adevăr el există. Prin urmare, apariția tuturor acestor alte elemente chimice din lume este foarte strâns legată de faptul că există acest nivel particular al carbonului. Însă, cunoscând legile fizicii, poziția acestuia ne apare nouă a fi un accident foarte complicat a 12 particule aflate într-o interacțiune complexă. Acest exemplu constituie o ilustrare excelentă a faptului că o înțelegere a legilor fizicii nu oferă neapărat o înțelegere în manieră directă a lucrurilor de importanță din lume. Detaliile trăirilor reale sunt adesea foarte departe de legile fundamentale.

Noi dispunem de o manieră de a vorbi despre lume, referindu-ne la ea ca la diferite ierarhii, sau niveluri. Acuma, nu intenționez să fiu foarte riguros atunci când împart lumea în niveluri bine determinate, dar voi preciza, descriind un număr de concepte, ce înțeleg eu prin ierarhii de noțiuni.

De exmplu, la un capăt al ierarhiilor avem legile fundamentale ale fizicii. Apoi inventăm alți termeni pentru idei care sunt aproximative, şi despre care noi credem că, în ultimă instanță, îşi găsesc explicația în termeni de legile fundamentale. De pildă, „căldura". Căldura se presupune a însemna vibrație, iar cuvântul folosit pentru un corp fierbinte nu reprezintă altceva decât cuvântul folosit pentru o cantitate de atomi care vibrează. Însă uneori, atunci când vorbim despre căldură, uităm o vreme de atomii care tremură; exact la fel cum, atunci când vorbim despre banchiză, nu ne gândim mereu la gheața hexagonală şi la fulgii de zăpadă căzuți inițial. Un alt exemplu de acelaşi fel îl constituie un cristal de sare. Privit din perspectivă fundamentală, el reprezintă o sumedenie de protoni, neutroni şi electroni; însă avem acest concept

de „cristal de sare“, care deja înglobează o întreagă structură de interacţiuni fundamentale. La fel stau lucrurile şi în cazul unei noţiuni precum „presiunea“.

Acuma, dacă urcăm pe scara ierarhiilor, la un alt nivel întâlnim proprietăţile substanţelor, cum ar fi „indicele de refracţie“ – modul în care lumina este deviată atunci când trece prin ceva – sau „tensiunea superficială“ – faptul că apa tinde să se comprime de la sine – ambele exprimabile prin valori numerice. Vă reamintesc că trebuie să coborâm cu mai multe niveluri de legi pentru a descoperi că este vorba despre atracţia dintre atomi etc. Însă pronunţăm „tensiune superficială“, şi atunci când o facem nu ne preocupăm mereu de mecanismele ei interne.

Să urcăm în continuare pe scara ierarhiilor. Odată cu apa, avem valurile, şi avem un lucru precum furtuna, iar cuvântul „furtună“ reprezintă o mulţime imensă de fenomene; la fel, „pată solară“; sau „stea“, care înseamnă o sumă de lucruri. Şi nu prea rentează să ne gândim retrospectiv la ele. De fapt, nici nu putem, căci cu cât urcăm mai mult, cu atât avem mai multe trepte intermediare, fiecare din ele prezentând un oarecare grad de slăbiciune. Încă nu le-am pătruns pe de-a-ntregul pe toate.

Pe măsură ce urcăm în această ierarhie a complexităţii, ajungem la chestiuni precum contracţie musculară, ori impuls nervos, chestiuni care reprezintă lucruri enorm de complicate din lumea palpabilă, şi care implică o organizare a materiei într-o manieră extrem de minuţioasă. Apoi vin lucruri precum „broască“.

Mergem pe urmă mai departe şi întâlnim cuvinte şi concepte cum ar fi „om“, şi „istorie“, sau „expedient politic“, şi aşa mai departe – o serie de noţiuni pe care noi le folosim pentru a înţelege lucrurile la un nivel încă şi mai înalt.

După aceea, ajungem la lucruri precum răul şi frumuseţea şi speranţa…

Care capăt este (dacă îmi este permis să folosesc o metaforă religioasă) mai aproape de Dumnezeu? Frumuseţea şi speranţa, sau legile fundamentale? Cred, desigur, că maniera corectă de a răspunde este că trebuie să privim întreaga interconexiune structurală a lucrurilor; şi că toate ştiinţele, şi nu numai ştiinţele, ci toate eforturile de factură intelectuală, reprezintă un demers de a sesiza conexiunile între ierarhii, de a lega frumuseţea de istorie, istoria de psihologia umană, psihologia umană de funcţionarea creierului, creierul de impulsurile nervoase, impulsurile nervoase de chimie, şi aşa mai departe, în sus şi în jos, în ambele sensuri. Iar în clipa de faţă nu o putem face, şi nu are rost să ne prefacem că am putea să ne apucăm să trasăm cu grijă o linie

de la un cap la altul al chestiei ăsteia, pentru că abia am început să întrezărim că există această ierarhie relativă.

Şi mai cred că nici unul din capete nu este mai aproape de Dumnezeu. A te situa la unul din capete şi a persista să o apuci tot într-acea direcţie, în speranţa că acolo se află înţelegerea completă, constituie o greşeală. A te situa de partea răului şi frumuseţii şi speranţei, sau de partea legilor fundamentale, în speranţa că astfel vei obţine o înţelegere profundă a întregii lumi, doar sub acest aspect, constituie o greşeală. Este lipsit de înţelepciune ca cei ce se specializează pe unul din capete şi cei ce se specializează pe celălalt să nutrească atâta desconsiderare unii faţă de alţii. (De fapt, n-o fac, dar aşa zice lumea.) Marea masă de truditori intermediari, care leagă paşii între ei, îmbunătăţesc continuu înţelegerea noastră asupra lumii. Ei muncesc atât la capete cât şi în mijloc, şi astfel desluşim treptat această formidabilă lume de ierarhii interconectate.

6

PROBABILITATE ŞI INCERTITUDINE: PERSPECTIVA MECANICII CUANTICE ASUPRA NATURII

La originea istoriei observaţiilor experimentale, sau a oricărui alt tip de observaţii asupra chestiunilor ştiinţifice, stă intuiţia. Ea se bazează efectiv pe observaţii simple în legătură cu obiecte de zi cu zi, care sugerează explicaţii rezonabile pentru nişte lucruri. Însă, pe măsură ce încercăm să ne lărgim şi să ne consolidăm descrierea a ceea ce vedem, pe măsură ce ea devine tot mai amplă şi observăm un domeniu tot mai vast de fenomene, simplele explicaţii se transformă în ceea ce noi numim legi. O trăsătură ciudată a lor este aceea că adesea ele par a deveni, din punctul de vedere al intuiţiei, din ce în ce mai ilogice şi mai îndepărtate de evidenţă. Pentru a lua un exemplu, în cadrul teoriei relativităţii se afirmă că opinia dumneavoastră cum că două lucruri se petrec în acelaşi timp constituie doar o părere: altcineva ar putea ajunge la concluzia că unul din acele evenimente a avut loc înaintea celuilalt; şi, prin urmare, se susţine că simultaneitatea reprezintă doar o senzaţie subiectivă.

Nu avem nici un motiv să ne aşteptăm ca lucrurile să stea altcumva, căci experienţa de zi cu zi implică numere mari de particule, ori chestii ce se mişcă foarte încet, ori alte condiţii aparte, care constituie în fapt o trăire limitată a realităţii. Prin experienţă directă nu se poate observa decât o mică parte din fenomenele lumii. Numai prin măsurători precise şi prin experimente minuţioase putem avea o viziune mai amplă. Iar în acel moment observăm lucruri neaşteptate: lucruri care sunt departe de ceea ce ne-am fi aşteptat... departe de ceea ce ne-am fi închipuit. Imaginaţia noastră este solicitată la maximum; nu aşa ca în ficţiune, unde trebuie să ne închipuim lucruri care propriu-zis nu există, ci pur şi simplu pentru a pricepe lucrurile care *sunt*. Acesta este genul de situaţii despre care doresc să vă vorbesc.

Să începem cu istoria luminii. Iniţial s-a presupus că lumina se comportă foarte mult precum un jet de particule, de corpusculi, aşa ca ploaia ori

ca gloanţele trase dintr-o armă. După aceea, odată cu progresul cercetărilor, a devenit limpede că nu putea fi aşa, că lumina se comporta de fapt ca o undă; ca valurile mării, de pildă. Apoi, în secolul douăzeci, după alte noi cercetări, s-a constatat iarăşi că, în multe privinţe, lumina se comportă efectiv precum particulele. În cadrul efectului fotoelectric, aceste particule puteau fi numărate – astăzi, ele poartă numele de fotoni.

Atunci când au fost puşi în evidenţă pentru prima dată, electronii se comportau exact ca particulele sau ca gloanţele, foarte simplist. Cercetări ulterioare au arătat, de exemplu prin intermediul experimentelor de difracţie cu electroni, că aceştia se comportau precum undele. Odată cu trecerea timpului, confuzia cu privire la modul în care se comportau propriu-zis aceste lucruri a crescut – unde sau particule, particule sau unde? Toate arătau şi a una şi a alta.

Această confuzie crescândă a fost înlăturată în 1925 sau 1926, odată cu introducerea ecuaţiilor corecte pentru mecanica cuantică. Acum cunoaştem cum se comportă electronii şi lumina. Dar cum să numesc asta? Dacă spun că se comportă ca nişte particule, vă las o impresie greşită; la fel şi dacă spun că se comportă ca nişte unde. Se comportă în felul lor propriu, inimitabil, pe care, tehnic, l-aş putea numi maniera mecanicii cuantice. Se comportă într-o anumită manieră cum nu aţi mai văzut vreodată. Pur şi simplu, experienţa dumneavoastră legată de ceea ce aţi văzut până acum este incompletă. Comportarea lucrurilor la scară mică este pur şi simplu diferită; un atom nu se comportă ca o greutate care oscilează atârnată de un resort. Şi nici ca o reprezentare miniaturală a Sistemului Solar, cu planete infime rotindu-se pe orbite. Se comportă într-o manieră cum nu aţi mai văzut vreodată.

O simplificare măcar totuşi există. În această privinţă, electronii se comportă în exact aceeaşi manieră ca şi fotonii; anapoda, dar în acelaşi fel.

Prin urmare, aprecierea modului de comportare are foarte mult de-a face cu imaginaţia, căci vom urmări să descriem ceva ce diferă de orice altceva despre care veţi fi având cunoştinţă. Cel puţin din acest punct de vedere, prelegerea de faţă este cea mai dificilă dintre toate, în sensul că ea este abstractă, că nu are tangenţă cu experienţa. Nu am cum să evit acest lucru. Să ţin o serie de prelegeri pe tema caracterului legilor fizicii, şi să nu descriu comportarea efectivă a particulelor la scară mică, ar însemna să nu mă achit de datorie. Acest aspect este caracteristic pentru absolut toate particulele din natură, este universal; deci, dacă vreţi să ştiţi despre caracterul legilor fizicii, este esenţial să luăm în discuţie acest aspect deosebit.

Va fi dificil. Însă dificultatea va fi de fapt de ordin psihologic, şi va consta în frământarea continuă izvorâtă din întrebarea pe care v-o veți tot pune: „Dar cum poate să fie aşa ceva?“ Va fi o reflectare a dorinței nestăpânite, dar cât se poate de zadarnice, de a pricepe lucrurile în termenii a ceva familiar. *Nu* am să vi le descriu în termeni de analogii cu ceva familiar; vi le voi descrie pur şi simplu. A fost o vreme când ziarele scriau că doar doisprezece oameni au înțeles teoria relativității. Nu cred să fi existat vreodată o asemenea perioadă. Este posibil să fi existat o vreme în care numai un singur tip s-o fi înțeles, pentru că el a fost cel care s-a prins de ea, înainte de a o aşterne pe hârtie. Însă după ce lumea a citit lucrarea, o grămadă de oameni au înțeles, într-un fel sau altul, teoria relativității; cu siguranță, mai mult de doisprezece. Pe de altă parte, cred că pot afirma fără teama de a greşi că nimeni nu înțelege mecanica cuantică. Aşa încât nu luați prea în serios prelegerea mea, cu sentimentul că aveți datoria să înțelegeți în termenii vreunui model ceea ce vă voi descrie. Pur şi simplu destindeți-vă şi savurați. Vă voi spune cum se comportă natura. Dacă pur şi simplu veți admite că probabil chiar se comportă astfel, atunci o veți găsi încântătoare, uluitoare. Dacă puteți, încercați să nu vă tot întrebați: „Dar cum poate să fie aşa ceva?“ Altfel, veți sfârşi într-o fundătură, într-o „ananghie“ din care n-a scăpat nimeni încă. Nimeni nu ştie cum poate fi aşa ceva.

Aşadar, dați-mi voie să vă descriu comportamentul electronilor sau fotonilor în maniera lor proprie din cadrul mecanicii cuantice. O voi face prin intermediul unui amalgam de asemănări şi contraste. Dacă aş face-o doar prin pură analogie, aş da greş; trebuie să fie asemănări şi contraste cu lucrurile care vă sunt familiare. Acestea se vor referi mai întâi la comportarea particulelor, pentru care voi adopta ca exemplu gloanțele, iar apoi la comportarea undelor, pentru care voi adopta ca exemplu valurile mării. Ceea ce intenționez este să inventez un anumit experiment, în cadrul căruia să vă spun mai întâi care ar fi situația în cazul în care am folosi particule, apoi, ce ne-am aştepta să se întâmple dacă ar fi vorba de unde, şi, în fine, ce se întâmplă atunci când prin sistem trec efectiv electroni sau fotoni. Acest singur experiment a fost menit să conțină în el întregul mister al mecanicii cuantice. El vă va pune în proporție de sută la sută în fața paradoxurilor şi tainelor şi ciudățeniilor naturii. Se dovedeşte că orice altă situație din mecanica cuantică poate fi explicată spunând: „Vă aduceți aminte cazul experimentului cu două fante? Este exact acelaşi lucru.“ Am să vă povestesc experimentul cu două fante. Nu voi evita nimic. Voi aborda natura în forma ei cea mai elegantă şi mai dificilă. Aici rezidă întregul mister.

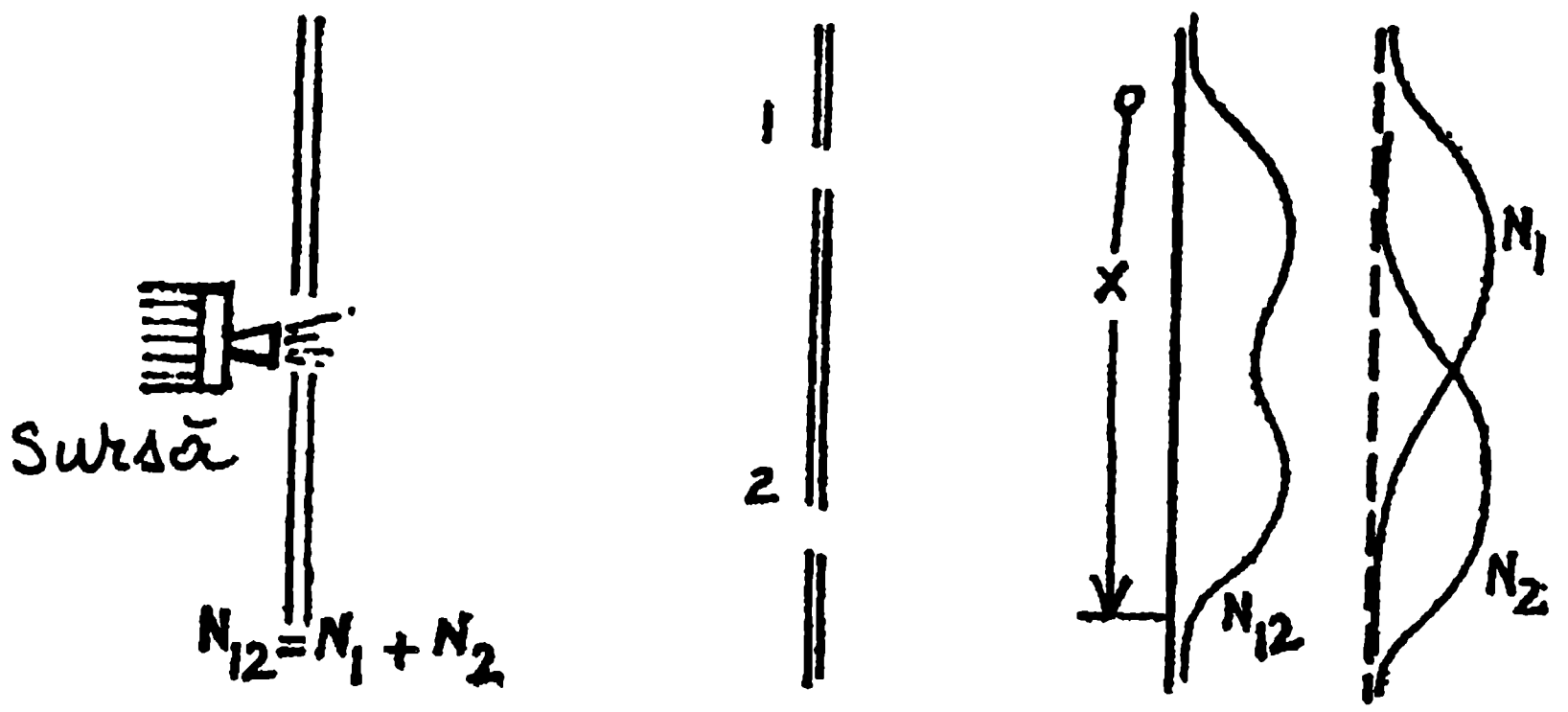


Figura 28

Începem cu gloanțe (fig. 28). Să presupunem că avem o sursă oarecare de gloanțe, o mitralieră, şi că în fața ei se găseşte un paravan blindat, prevăzut cu o gaură prin care să treacă acestea. La distanță mare, avem un al doilea paravan, cu două găuri – celebrele fante. Voi vorbi o grămadă despre ele, aşa încât le voi boteza fanta nr.1 şi fanta nr.2. În trei dimensiuni, vă puteți imagina nişte găuri rotunde; pe desen avem numai o secțiune transversală. Încă la şi mai mare distanță, se găseşte un alt paravan, care nu este decât un perete oarecare ce opreşte gloanțele. Pe el se poate monta în orice punct un detector, care în cazul gloanțelor reprezintă o cutie cu nisip în care acestea se strâng, urmând a fi numărate. Voi face nişte experimente în care voi număra câte gloanțe ajung la detector, la cutia cu nisip, atunci când ea se găseşte în diferite locuri de-a lungul peretelui. Pentru a descrie aceasta, voi măsura distanța la care se află cutia în raport cu un punct oarecare, şi o voi numi „x“. Voi spune ce se întâmplă atunci când „x“ variază, aceasta însemnând pur şi simplu că detectorul este mutat în sus şi în jos.

Mai întâi, aş dori să aduc câteva modificări gloanțelor reale, prin intermediul a trei idealizări. Prima dintre ele este aceea că mitraliera are joc şi se zgâlțâie foarte tare, iar gloanțele pleacă în diferite direcții, nu doar în față; ele pot ricoşa de marginile găurii din blindaj. În al doilea rând, ar trebui să precizăm, deşi aceasta nu este foarte important, că gloanțele au toate aceeaşi viteză sau energie. În fine, cea mai importantă idealizare prin care experimentul diferă de realitate, constă în faptul că impune ca aceste gloanțe să fie absolut indestructibile. Astfel, ceea ce vom găsi în cutie nu vor fi fragmente de plumb sau schije, ci gloanțe întregi. Imaginați-vă că este vorba de nişte gloanțe dure şi de un blindaj moale.

Primul aspect observabil în legătură cu experimentul este faptul că obiectele vin în tranşe. Atunci când energia soseşte, ea este toată conținută într-un singur glonț, un foc de armă. Dacă le numărați, aveți unu, două, trei, patru gloanțe; lucrurile vin ghem. Se presupune în acest caz că toate sunt de dimensiuni egale, şi că dacă este ca un lucru să pătrundă în cutie, el ori se găseşte tot, ori nu este deloc. Mai mult, în ipoteza că arma nu trage atât de repede încât să nu am timp să decelez focurile, dacă montez două cutii, nu obțin niciodată două gloanțe în ele în acelaşi timp. Cum fiecare lucru constituie un ghem singular, identificabil, răresc foarte mult ritmul tragerii şi mă uit imediat în cele două cutii, astfel încât să nu obțin niciodată două gloanțe în acelaşi timp în ele.

Acuma, ceea ce intenționez eu este să măsor numărul de gloanțe care sosesc în medie într-o perioadă de timp. Să zicem că aşteptăm o oră şi că numărăm gloanțele din nisip, după care facem media. Obținem numărul de gloanțe care sosesc pe oră, pe care îl putem numi „probabilitatea de sosire", pentru că el arată pur şi simplu care este şansa ca un glonț ce trece prin una din fante să ajungă într-un loc anume. Desigur, numărul acesta variază odată cu variația lui „x". Pe desen am trasat pe axa orizontală numărul de gloanțe pe care le obțin dacă țin cutia în fiecare punct timp de o oră. Se obține o curbă care aduce mai mult sau mai puțin cu cea pe care am numit-o N_{12}. Atunci când cutia se găseşte în spatele uneia din fante, ea recepționează o sumedenie de gloanțe; atunci când nu este aliniată, ea nu mai receptează atâtea, pentru că gloanțele ricoşează de marginile găurilor. În lateral, curba se estompează. Graficul descrie dependența în raport cu „x" a numărului de gloanțe înregistrate în timp de o oră atunci când ambele fante sunt deschise. Voi numi acest număr N_{12}, şi el nu reprezintă altceva decât suma gloanțelor care sosesc prin fanta nr.1 şi fanta nr.2.

Trebuie să vă reamintesc faptul că numărul pe care l-am trasat nu vine în tranşe, ci poate lua orice valoare doreşte. În ciuda faptului că gloanțele vin ghem, el poate fi egal cu, să zicem, 2,5. Tot ceea ce înțeleg prin două gloanțe şi jumătate pe oră, este că dacă efectuați experimentul timp de zece ore, obțineți douăzeci şi cinci de gloanțe, deci o medie de două gloanțe şi jumătate pe oră. Sunt convins că ați auzit cu toții gluma în legătură cu familia americană de mijloc, care pare să aibă doi copii şi jumătate. Asta nu înseamnă că în fiecare familie există o jumătate de copil – copiii vin în tranşe. Cu toate acestea, atunci când se face media pe familie, se poate obține orice valoare. Tot astfel, numărul N_{12}, care înseamnă numărul de gloanțe ce ajung în medie în cutie pe oră, nu trebuie să fie întreg; ceea ce măsurăm noi este probabi-

litatea de sosire, denumire care constituie termenul tehnic folosit pentru a exprima numărul mediu de detectări într-un anumit interval de timp.

În fine, dacă analizăm curba N_{12}, o putem interpreta uşor ca suma a două curbe, una care reprezintă ceea ce voi numi N_1, numărul de gloanţe ce trec atunci când fanta nr.2 este acoperită cu un blindaj, şi alta numită N_2, numărul de gloanţe ce trec numai prin fanta nr.1, atunci când cealaltă este închisă. Găsim acum o lege foarte importantă, aceea că numărul de gloanţe ce sosesc prin ambele fante deschise este egal cu numărul celor care sosesc prin fanta nr.1, plus cele prin fanta nr.2. Această afirmaţie, faptul că tot ceea ce aveţi de făcut este să adunaţi cantităţile respective, o voi numi „în absenţa interferenţei".

$$N_{12} = N_1 + N_2 \quad \text{(în absenţa interferenţei)}$$

Asta în ceea ce priveşte gloanţele. Acum, că am terminat cu ele, o luăm de la capăt, de această dată cu valurile mării (fig. 29). Sursa o constituie acum o chestie mare şi solidă, care este mişcată în sus şi în jos în apă. Blindajul devine un lung şir de barje sau şlepuri, cu un loc liber la mijloc. Poate că, în loc de mari valuri oceanice, ar fi mai bine să consider nişte mici încreţituri: sună mai potrivit. Îmi mişc degetul în sus şi în jos, producând unduiri ale apei, iar ca barieră folosesc o bucată de scândură cu o gaură, prin care să treacă vălurelele. Pe urmă, mai am o a doua barieră cu două găuri şi, în final, un detector. Ce face acesta? El detectează cât de mult tresaltă apa. De pildă,

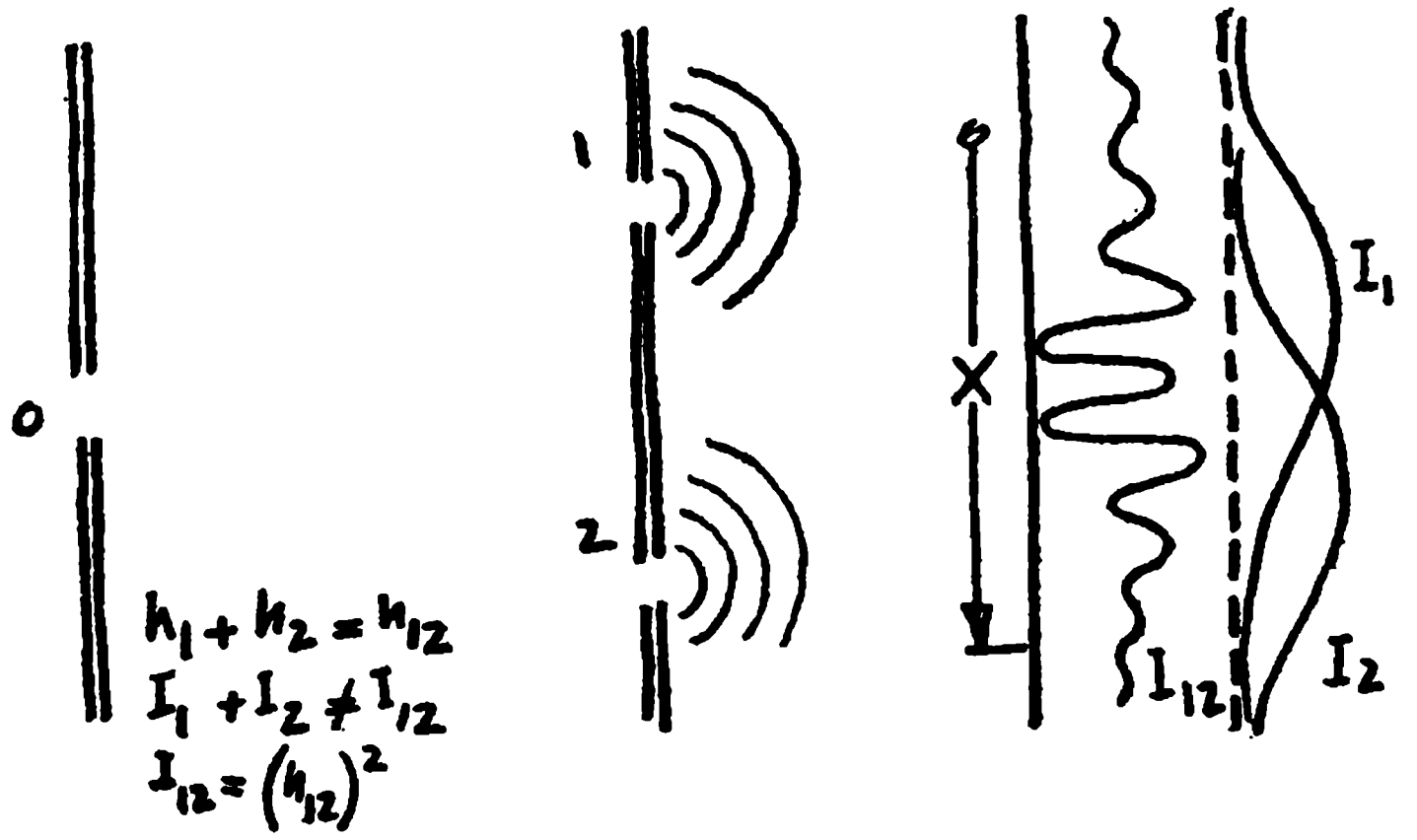


Figura 29

aşez pe apă un dop de plută şi măsor cât de mult urcă sau coboară el. În fapt, ceea ce am de gând să măsor este energia cu care se agită dopul, care este exact proporţională cu energia transportată de valuri. Încă ceva: unduirile sunt produse în mod absolut regulat şi perfect egale, astfel încât spaţiul dintre valuri să fie exact acelaşi. Un lucru important în cazul undelor din apă este faptul că ceea ce măsurăm noi poate avea orice valoare. Noi măsurăm intensitatea undelor, sau energia dopului, iar dacă valurile sunt foarte line, dacă degetul meu abia tresaltă în apă, atunci dopul se mişcă foarte puţin. Indiferent de valoare, aceste mărimi sunt direct proporţionale. Ele nu vin în tranşe: nu se pune problema să fie prezente în întregime sau deloc.

Măsurarea intensităţii undelor înseamnă, mai concret, măsurarea energiei generate de undă într-un anumit punct. O voi nota cu „I", pentru a vă reaminti că este vorba de o intensitate, şi nu de vreun număr de particule. Ce obţinem atunci când măsurăm intensitatea? Pe desen (fig. 29) este reprezentată curba I_{12}, pentru cazul în care ambele fante sunt deschise. Este o curbă complexă, care arată interesant. Dacă aşezăm detectorul în diferite locuri, obţinem o intensitate ce variază foarte rapid, într-o manieră ciudată. Probabil că motivul vă este cunoscut. Valurile provenind de la fiecare fantă prezintă culmi şi depresiuni. Dacă ne situăm într-un punct aflat exact la distanţă egală de cele două fante, undele sosesc acolo în acelaşi timp, şi culmile sau depresiunile se suprapun, producând o vibraţie puternică. Exact în centru oscilaţia este maximă. Pe de altă parte, dacă mutăm detectorul într-un anumit punct mai depărtat de fanta nr.2 decât de fanta nr.1, undelor din 2 le ia ceva mai mult timp să ajungă acolo decât celor din 1. Atunci când culmea provenind din 1 ajunge acolo, cea provenind din 2 mai are încă ceva de mers; în fapt, în acel moment, în punctul considerat se găseşte o depresiune provenind din 2, astfel încât apa acolo încearcă să se mişte în acelaşi timp şi în sus şi în jos, sub acţiunea influenţelor valurilor de la cele două fante. Rezultatul net este acela că ea nu se mişcă deloc, sau practic insesizabil. Deci, acolo avem o denivelare minimă. Mai departe, dacă ne mutăm încă şi mai mult, obţinem o întârziere suficientă între culmi pentru ca ele să ajungă împreună de la cele două fante, chiar dacă în fapt una din ele este cu un val în urma celeilalte. Astfel, obţinem din nou un maxim, apoi încă un minim, şi încă un maxim, şi încă un minim... în funcţie de modul în care „interferă" culmile şi depresiunile. Încă o dată, un cuvânt, interferenţa, este folosit în cadrul fizicii într-o manieră ciudată.

Atunci când cele două unde dau naştere unei intensităţi mai mari, avem ceea ce se numeşte interferenţă constructivă. Chestia importantă este că I_{12}

nu este acelaşi lucru ca I_1 plus I_2, şi de aceea spunem că este vorba de interferență constructivă şi distructivă. Putem afla cum arată I_1 şi I_2, închizând fanta nr.2 pentru a găsi pe I_1, şi închizând fanta nr.1 pentru a găsi pe I_2. Intensitatea găsită atunci când una din fante este închisă, reprezintă pur şi simplu undele provenind de la cealaltă fantă în absența interferenței. Observați că I_1 este la fel ca N_1, iar I_2 este la fel ca N_2, şi totuşi I_{12} este cât se poate de diferit de N_{12}.

Legat de aceasta, matematica implicată de curba I_{12} este deosebit de interesantă. Ceea ce este adevărat aici, este faptul că înălțimea apei când ambele fante sunt deschise, înălțime pe care o vom nota cu h_{12}, este egală cu înălțimea pe care o obțineți atunci când deschideți numai fanta nr.1 plus înălțimea pe care o obțineți atunci când deschideți numai fanta nr.2. Astfel, pentru o depresiune provenind de la fanta nr.2, înălțimea este negativă, şi se poate anula cu cea de la fanta nr.1. Acest lucru este vizibil atunci când se ia în discuție înălțimea apei, însă se dovedeşte faptul că în toate cazurile, cum ar fi de exemplu situațiile în care ambele fante sunt deschise, intensitatea nu corespunde înălțimii, ci este proporțională cu pătratul acesteia. Tocmai acest motiv, faptul că operăm cu pătrate, este cel pentru care obținem aceste curbe foarte interesante.

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

dar

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \quad \text{(interferență)}$$
$$I_{12} = (h_{12})^2$$
$$I_1 = (h_1)^2$$
$$I_2 = (h_2)^2$$

Asta a fost cu apa. Acum o luăm de la capăt, de această dată cu electroni (fig. 30). Sursa este un filament, paravanele sunt plăci de tungsten cu găuri în ele, iar ca detector avem orice sistem electric suficient de sensibil pentru a sesiza sarcina unui electron, indiferent de energia cu care soseşte acesta de la sursă. Dacă preferați, în loc de electroni şi plăci de tungsten am putea folosi fotoni şi hârtie neagră – în fapt, hârtia neagră nu este foarte bună, din cauză că fibrele nu permit realizarea unor găuri netede, deci ne-ar trebui altceva – iar ca detector, un fotomultiplicator capabil să deceleze fotonii individuali care sosesc prin sistem. Ce se întâmplă în fiecare din situații? Voi discuta numai cazul electronilor, întrucât cel al fotonilor este exact la fel.

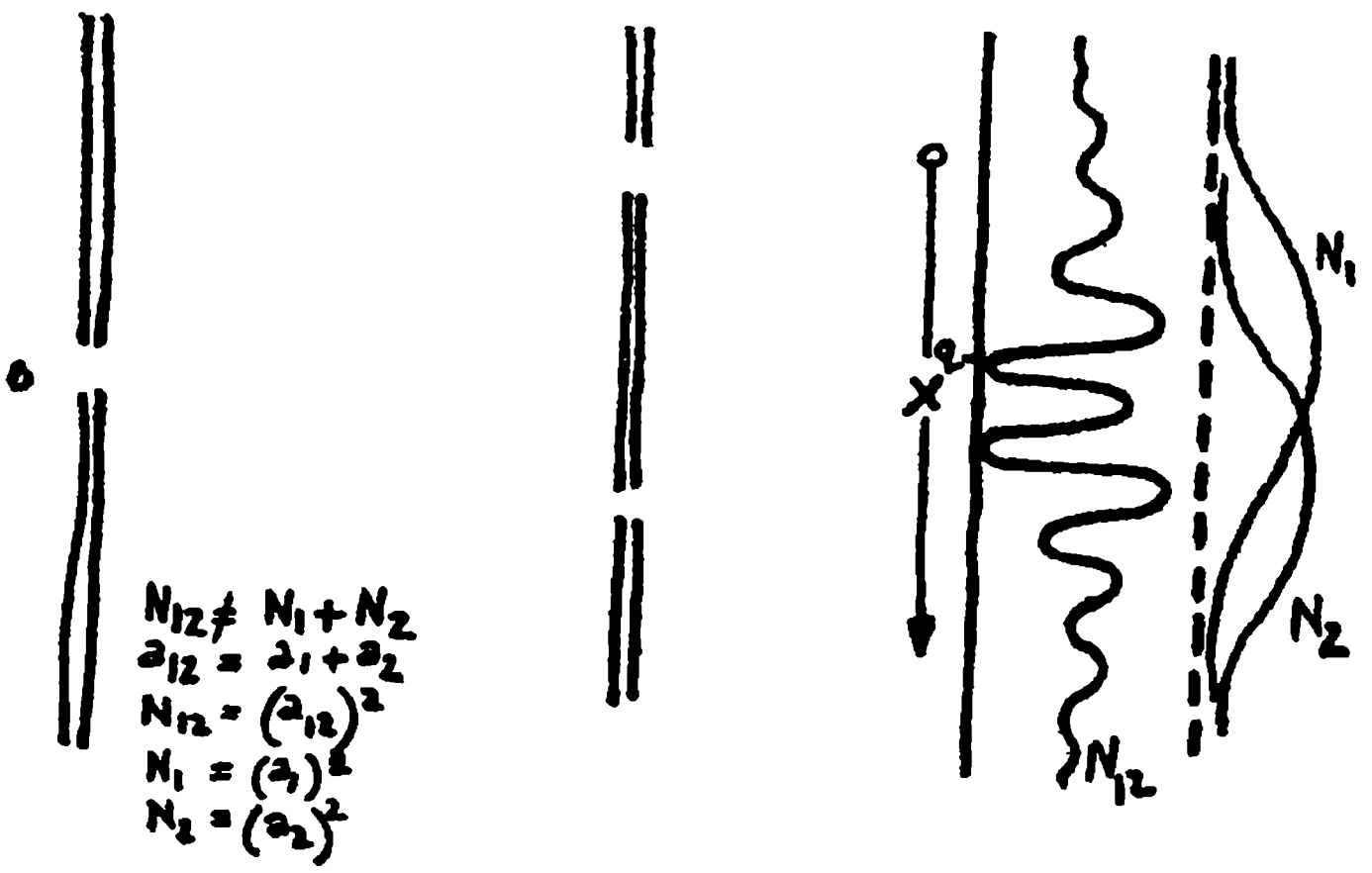


Figura 30

Mai întâi, ceea ce obţinem cu ajutorul detectorului electric conectat la un amplificator suficient de puternic, sunt păcănituri, tranşe, categoric sunt gheme. Clicul înregistrat are o anumită tărie, iar tăria este tot timpul aceeaşi. Dacă micşoraţi puterea sursei, păcăniturile sunt mai rare, dar continuă să aibă aceeaşi tărie. Dacă măriţi puterea sursei, ele devin atât de dese încât bruiază amplificatorul. Puterea sursei trebuie menţinută suficient de scăzută pentru ca numărul de clicuri să nu depăşească rezoluţia detectorului. În al doilea rând, dacă aşezaţi încă un detector într-un alt loc şi le ascultaţi pe amândouă în acelaşi timp, nu o să recepţionaţi niciodată două păcănituri în acelaşi timp, cel puţin dacă puterea sursei este suficient de mică şi precizia cu care măsuraţi timpul este suficient de mare. Dacă micşoraţi intensitatea sursei astfel încât electronii care sosesc să fie puţini şi rari, ei nu vor produce niciodată clicuri simultane în ambii detectori. Asta înseamnă că ceea ce vine, soseşte în tranşe: are o mărime bine determinată şi ajunge doar într-un singur loc odată.

În regulă; deci electronii sau fotonii vin ghem. Ca atare, putem să procedăm aşa cum am procedat în cazul gloanţelor: putem măsura probabilitatea de sosire. Ceea ce facem este să punem detectorul în diferite locuri – de fapt, dacă vrem, deşi este scump, putem aşeza detectoare peste tot şi putem trasa întreaga curbă simultan – şi să îl ţinem acolo, să zicem, câte o oră, măsurând în final câţi electroni au sosit în medie. Ce rezultat obţinem pentru numărul de electroni înregistraţi? Acelaşi gen de N_{12} ca în cazul gloanţelor? Figura 30 ne arată ce obţinem atunci când ambele fante sunt deschise. Aşa se prezintă fenomenul naturii: de a da naştere aceleiaşi curbe pe care aţi obţine-o în

cazul interferenței undelor. Şi pentru ce caz produce ea această curbă? Nicidecum pentru energia unui val, ci pentru probabilitatea de sosire a unui astfel de ghem.

Matematica este simplă. Înlocuim pe I cu N, şi deci trebuie să schimbăm şi pe h cu altceva nou – nu este vorba aici de înălțimea a nimic – aşa încât inventăm o mărime „a", pe care o numim amplitudine a probabilității, deoarece nu ştim ce reprezintă. În cazul acesta, a_1 înseamnă amplitudinea probabilității de sosire de la fanta nr.1, iar a_2 amplitudinea probabilității de sosire de la fanta nr.2. Pentru a obține amplitudinea probabilității totale de sosire, se adună cele două şi se ridică la pătrat. Aceasta este o reproducere fidelă a ceea ce se întâmplă în cazul undelor, pentru că trebuie să obținem aceeaşi curbă, şi deci folosim aceeaşi matematică.

Ar trebui să menționez totuşi un lucru despre interferență. Nu am spus ce se întâmplă dacă închidem una din fante. Haideți să încercăm să analizăm această curbă interesantă, presupunând că electronii au trecut prin una sau alta din găuri. O închidem pe a doua din ele şi măsurăm câți electroni trec prin fanta nr.1, şi obținem curba simplă N_1. Sau putem astupa cealaltă gaură şi măsurăm câți trec prin fanta nr.2, şi obținem curba N_2. Dar prin suprapunerea acestora două nu rezultă acelaşi lucru ca $N_1 + N_2$: ele prezintă interferență. În fapt, matematica este dată de această formulă ciudată, conform căreia probabilitatea de sosire este egală cu pătratul unei amplitudini, care la rândul ei este suma a două părți: $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. Întrebarea este: cum se poate să ne iasă rezultatul că, atunci când electronii trec prin fanta nr.1, ei sunt distribuiți într-un fel, atunci când trec prin fanta nr.2, sunt distribuiți în alt fel, şi totuşi, atunci când ambele fante sunt deschise, nu se obține suma primelor două? De exemplu, dacă se plasează detectorul în punctul q, cu ambele fante deschise, nu se obține practic nimic; şi totuşi, dacă se închide una din fante, se obține detectare din plin, iar dacă se închide cealaltă, se obține ceva intermediar. Las ambele găuri deschise, şi nu obțin nimic; îi las să treacă prin ambele fante, şi ei nu mai vin deloc. Sau să luăm punctul din centru: se poate arăta că valoarea în acel loc este mai mare decât suma celor două curbe corespunzătoare câte unei singure fante. Ați putea crede că, pentru a explica fenomenul, există vreo argumentație savantă, cum că electronii au un fel de a tot trece înainte şi înapoi prin fante, sau că efectuează ceva complicat, sau că se despică în două şi trec câte jumătate prin fiecare fantă, sau altceva asemănător. Totuşi, nimeni nu a reuşit să vină cu o explicație satisfăcătoare, pentru că, până la urmă, curba este atât de simplă din cauză că matematica este atât de simplă (fig. 30).

TABEL

Gloanțe	Valuri	Electroni
Vin în transe	Pot avea orice mărime	Vin în transe
Se măsoară probabilitatea de sosire	Se măsoară intensitatea undelor	Se măsoară probabilitatea de sosire
$N_{12}=N_1+N_2$	$I_{12}\neq I_1+I_2$	$N_{12}\neq N_1+N_2$
Fără interferență	Prezintă interferență	Prezintă interferență

Figura 31

Aşadar, voi rezuma spunând că electronul vine ghem, asemenea unei particule, însă probabilitatea de sosire a acestor tranşe se calculează asemenea intensităţii undelor. Tocmai în acest sens se afirmă că ei se comportă uneori ca o particulă şi uneori ca o undă. Se comportă în două moduri diferite în acelaşi timp (fig. 31).

Asta este tot. Aş putea da o descriere matematică a modului de calcul pentru probabilitatea de sosire a electronilor în orice situaţie dată, şi cu asta prelegerea s-ar termina... numai că există o serie de subtilităţi implicate de faptul că natura funcţionează astfel. Există un număr de lucruri ciudate, şi aş dori să prezint aceste ciudăţenii, deoarece s-ar putea ca ele să nu fie evidente în acest punct al discuţiei.

Începem prezentarea subtilităţilor cu discutarea unei propoziţii care, din moment ce chestiile acestea sunt gheme, am fi crezut-o rezonabilă. Cum ceea ce soseşte constituie totdeauna o tranşă întreagă, în cazul de faţă un electron, este logic, în mod evident, să presupunem că acesta fie trece prin fanța nr.1, fie prin fanta nr.2. Dacă el este un ghem, pare cât se poate de normal că nu poate proceda altfel. Voi discuta această propoziţie, aşa încât îi voi da un nume: o voi numi „propoziţia A“.

Propoziția A

Un electron trece fie prin fanta nr.1, fie prin fanta nr.2.

Acuma, deja am discutat un pic ce se întâmplă cu propoziţia A. Dacă ar fi adevărat că un electron trece fie prin fanta nr.1, fie prin fanta nr.2, atunci numărul total de sosiri ar trebui să fie exprimabil ca suma a două contribuţii. El ar fi egal cu numărul de sosiri via fanta nr.1, plus numărul de sosiri via fanta nr.2. Din moment ce curba rezultantă nu poate fi exprimată într-o manieră atât de drăguță, ca sumă a două părți simple, şi cum experimentele de determinare a numărului de sosiri atunci când este deschisă o singură gaură nu conduc la rezultatul că totalul reprezintă suma părţilor, este evident că ar trebui concluzionat că propoziția A este falsă. E logic. Din nefericire, sau din fericire, cum vreți să considerați, logica poate fi verificată prin experiment. Trebuie să găsim dacă este sau nu adevărat faptul că electronii trec fie prin fanta nr.1, fie prin fanta nr.2, sau dacă nu cumva ei dau târcoale ambelor fante şi se scindează temporar, sau altcumva.

Tot ce avem de făcut este să-i urmărim. Iar pentru a-i vedea, trebuie să fie lumină. Aşa încât aşezăm în spatele fantelor o sursă foarte puternică de lumină. Lumina este împrăştiată de electroni – ricoşează de ei – astfel că, dacă sursa este suficient de intensă, putem vedea electronii trecând. Prin urmare, ne dăm într-o parte şi ne uităm să vedem dacă, atunci când este numărat un electron, nu se observă cumva cu o clipă înainte vreo străfulgerare în spatele fantei nr.1, sau în spatele fantei nr.2, sau poate câte un soi de jumătate de străfulgerare în ambele părți simultan. Vom descoperi acum cu ochii noştri cum stau lucrurile. Aprindem lumina şi urmărim; şi, iată, descoperim că de fiecare dată când detectorul numără un electron, se vede o străfulgerare fie în spatele fantei nr.1, fie în spatele fantei nr.2. Am descoperit că, atunci când privim, electronul vine sută la sută, în întregime, printr-una singură din găuri. Un paradox!

Haideți să prindem aici natura la anaghie. Să vă arăt ce intenționăm: vom lăsa lumina aprinsă, şi vom urmări să numărăm câți electroni trec. Vom alcătui două rubrici, una pentru fanta nr.1 şi alta pentru fanta nr.2, şi vom nota în dreptul lor pe unde a trecut fiecare electron care a ajuns la detector. Cum arată rubrica pentru fanta nr.1 atunci când totalizăm diferitele poziţii ale

detectorului? Ce vedem dacă ne uităm în spatele fantei nr.1? Vedem curba N_1 (fig. 30). Rubrica este distribuită exact aşa cum ne-am închipuit atunci când am închis fanta nr.2; în mare măsură ea arată la fel, indiferent dacă ne uităm sau nu. Deci, dacă închidem fanta nr.2, obţinem aceeaşi distribuţie a sosirilor ca în cazul în care am privi fanta nr.1; reciproc, numărul sosirilor via fanta nr.2 este şi el tot o curbă simplă, N_2. Păi, atunci, numărul total al sosirilor *trebuie să fie* suma lor. Trebuie să fie egal cu numerele N_1 şi N_2 adunate; căci fiecare din electroni a fost bifat fie în rubrica 1, fie în rubrica 2. Numărul total *trebuie categoric să fie* suma celor două. Trebuie să aibă distribuţia $N_1 + N_2$. Însă eu am afirmat că este distribuit potrivit curbei N_{12}. Nu; el este distribuit conform lui $N_1 + N_2$. Chiar este, bineînţeles; aşa trebuie să fie, şi aşa şi este. Dacă marchez cu prim rezultatele atunci când lumina este aprinsă, găsim că N_1' este practic acelaşi ca N_1, cel în absenţa luminii, iar N_2' este aproape identic cu N_2. Însă numărul N_{12}' pe care îl observăm atunci când lumina este aprinsă şi ambele fante sunt deschise, *este* egal cu numărul de electroni înregistrat prin fanta nr.1 plus cel înregistrat prin fanta nr.2. Acesta e rezultatul pe care îl obţinem atunci când lumina este aprinsă. Obţinem rezultate diferite, după cum lumina este stinsă sau nu. Dacă o aprindem, distribuţia este $N_1 + N_2$. Dacă o stingem, ea este N_{12}. Dacă o aprindem la loc, iar este $N_1 + N_2$. Vedeţi, aşadar, că am prins natura la strâmtoare! Ca atare, am putea să spunem că lumina afectează rezultatul. În cele două situaţii obţinem rezultate diferite. Am putea tot astfel să afirmăm că lumina afectează comportarea electronilor. Dacă ne referim la mişcarea electronilor în timpul experimentului, ceea ce este oarecum impropriu, putem spune că lumina afectează mişcarea, deviind sau şutând electronii dinspre punctele de maxim de interferenţă către cele de minim, şi netezind astfel curba la valoarea simplă $N_1 + N_2$.

Electronii sunt foarte delicaţi. Dacă luminaţi o minge de baseball şi vă uitaţi la ea, nu contează, mingea merge mai departe. Dar dacă proiectaţi o lumină asupra unui electron, aceasta îl înghiontește un pic şi, în loc să facă ceva, el va face altceva. Lumina aprinsă constituie o puternică influenţă. Să presupunem atunci că încercăm să o facem din ce în ce mai slabă, până aproape de zero, şi că folosim nişte detectori de lumină foarte sensibili. Pe măsură ce lumina slăbeşte, este de aşteptat ca aceasta să afecteze din ce în ce mai puţin electronii, făcând ca tiparul de interferenţă să nu mai sufere schimbarea categorică de la N_{12} la $N_1 + N_2$. Ar trebui cumva să se revină la situaţia din absenţa luminii. Dar cum se poate trece de la o curbă la cealaltă? Păi, evident, lumina nu este asemenea valurilor mării. Ea soseşte la rândul ei în maniera unor particule, numite fotoni. Pe măsură ce intensitatea luminii

scade, se micşorează numărul de fotoni care provin de la sursă, şi nu efectul lor. Obținem din ce în ce mai puțini fotoni, până când pe un electron se poate împrăştia cel mult un foton. Dacă avem prea puțini fotoni, este posibil ca uneori un electron să treacă fără să îl vedem. Prin urmare, o lumină foarte slabă nu înseamnă o perturbare mică, ci pur şi simplu un număr mic de fotoni. Rezultatul este că în acest caz trebuie să mai inventăm o rubrică, intitulată „nevăzuți". Atunci când lumina este foarte puternică, la această rubrică intră puțini electroni; atunci când lumina este foarte slabă, majoritatea electronilor intră la această rubrică. Aşadar, avem trei rubrici: fanta nr.1, fanta nr.2 şi nevăzuți. Cam puteți bănui acum ce se întâmplă: electronii pe care îi vedem sunt distribuiți conform curbei $N_1 + N_2$; cei pe care nu îi vedem, sunt distribuiți conform curbei N_{12}. Pe măsură ce micşorăm lumina, vedem din ce în ce mai puțini electroni, şi tot mai mulți trec nevăzuți. În toate cazurile, curba efectivă este o suprapunere a celor două, deci pe măsură ce lumina devine din ce în ce mai slabă, distribuția tinde în manieră uniformă către N_{12}.

Nu am cum să discut aici numărul mare de moduri diferite în care se sugerează cum putem afla prin ce fantă a trecut electronul. Totuşi, se dovedeşte de fiecare dată că este imposibil să ne aranjăm în vreun fel în care să putem spune asta, fără a perturba tiparul sosirilor electronilor, fără a distruge interferența. Şi nu numai în cazul luminii: orice altceva am folosi, este imposibil în principiu de făcut aceasta. Dacă doriți, puteți inventa multe moduri în care să afirmați prin ce fantă trece electronul, şi să obțineți una sau alta din variante. Dar dacă veți încerca în acelaşi timp să faceți ca acel instrument să nu deranjeze mişcarea electronului, rezultatul va fi că nu veți mai putea spune prin ce gaură a trecut el, şi că veți ajunge din nou la situația complicată.

Atunci când a descoperit legile mecanicii cuantice, Heisenberg a sesizat că aceste legi ale naturii nu pot fi consistente decât dacă există o anume limitare fundamentală a abilităților noastre experimentale, neremarcată anterior. Cu alte cuvinte, din perspectivă experimentală, nu putem fi oricât de delicați. El a avansat Principiul Incertitudinii, care, enunțat în termenii experimentului nostru, sună în modul următor (Heisenberg l-a enunțat în alt mod, dar ele sunt absolut echivalente, şi se poate ajunge de la unul la celălalt): „Este imposibil de proiectat un aparat care să determine prin ce fantă trece electronul, şi care, în acelaşi timp, să nu-l deranjeze într-atât de mult încât să distrugă tiparul interferenței." Nimeni nu a găsit vreo soluție în această privință. Sunt convins că vă dau ghes tot felul de metode de determinare a fantei prin care trece acesta; dar, pe oricare din ele ați analiza-o cu atenție, ați constata că ceva este în neregulă. Vă veți fi închipuind că puteți s-o faceți fără a deranja electronul:

se dovedeşte de fiecare dată că ceva nu merge, că puteți pune totdeauna diferențele între tipare pe seama perturbațiilor induse de instrumentele folosite pentru determinarea găurii prin care trece el.

Acest fapt constituie o caracteristică fundamentală a naturii, şi ne indică ceva în general. Dacă mâine s-ar descoperi o nouă particulă, kaonul – de fapt, kaonul a fost deja descoperit, dar, ca să-i zic cumva, am numit-o astfel – şi dacă aş folosi kaoni care să interacționeze cu electronii pentru a determina prin ce fantă trec aceştia din urmă, eu aş şti deja dinainte – sper – suficiente lucruri despre comportarea noii particule, şi aş putea afirma că este imposibil ca ea să fie de o asemenea natură încât să îmi permită să aflu ce doresc fără a produce simultan o perturbare asupra electronilor, fără a transforma tiparul de interferență în unul fără interferență. Prin urmare, Principiul Incertitudinii poate fi folost ca un principiu general de a prevedea multe din trăsăturile unor obiecte necunoscute.

Haideți să ne întoarcem la propoziția A. „Electronii trebuie să treacă fie printr-o fantă, fie prin cealaltă.“ Este sau nu este adevărată? Fizicienii au un mod al lor de a evita să cadă în capcanele ce li se întind. Ei îşi stabilesc regulile de gândire după cum urmează. Dacă ai un aparat care este capabil să determine prin ce fantă trece electronul (şi *poți* avea un astfel de aparat), atunci poți afirma că el trece fie printr-una, fie prin cealaltă. Chiar aşa şi face: trece prin una din ele... dacă te uiți. Dar dacă nu ai nici un aparat de acest gen, atunci nu poți afirma că trece fie printr-o fantă, fie prin cealaltă. (De afirmat, tot poți să o *afirmi*... dar numai cu condiția ca în momentul imediat următor să opreşti raționamentul şi să nu tragi nici o concluzie din aceasta. Dar decât să îşi stopeze instantaneu raționamentul, fizicienii preferă să nu o afirme.) A conchide că atunci când nu te uiți electronul trece fie prin una din găuri, fie prin cealaltă, înseamnă a genera o eroare de predicție. Aceasta este frânghia logică pe care trebuie să mergem, dacă dorim să interpretăm natura.

Această propoziție la care mă refer este una generală. Nu este vorba de două fante, este vorba de o afirmație generală, care poate fi enunțată în modul următor. Probabilitatea oricărui eveniment din cadrul unui experiment ideal – aceasta înseamnă pur şi simplu un experiment în care totul este precizat oricât de exact – este egală cu pătratul a ceva, pe care în cazul de față l-am numit „a“, amplitudinea probabilității. Atunci când un eveniment se poate petrece în mai multe maniere alternative, amplitudinea probabilității, acest număr „a“, reprezintă suma „a“-urilor corespunzătoare diverselor variante. Dacă se efectuează un experiment capabil să determine ce variantă este aleasă, probabilitatea evenimentului se schimbă: ea nu mai este egală atunci

cu pătratul mărimii „a“, ci devine egală cu suma probabilităților corespunzătoare fiecărei alternative. Adică, se pierde interferența.

Acuma, întrebarea este: cum funcționează propriu-zis aceasta? Oare ce mecanism produce efectiv aşa ceva? Nimeni nu cunoaşte nici un mecanism. Nimeni nu vă poate oferi o explicație mai profundă a acestui fenomen decât cea pe care v-am dat-o; vreau să zic, o descriere a lui. Vă pot oferi o explicație mai cuprinzătoare, în sensul că vă pot da mai multe exemple care să arate faptul că este imposibil de precizat prin ce fantă trece electronul, fără a distruge în acelaşi timp tiparul interferenței. Vă pot prezenta o clasă mai largă de experimente decât doar experimentul de interferență cu două fante. Dar asta nu înseamnă decât să repet acelaşi lucru până când este asimilat. Nu este cu nimic mai profund; este doar mai cuprinzător. Matematica poate fi făcută mai precisă; se poate preciza faptul că în loc de numere reale avem numere complexe, şi vreo alte două-trei aspecte minore, care nu au nici o legătură cu ideea principală. Însă misterul profund este cel pe care vi l-am descris, şi nimeni nu îl poate pătrunde mai în profunzime la momentul de față.

Ceea ce am calculat până în acest punct este probabilitatea de sosire pentru un electron. Întrebarea este dacă există oare vreun mod în care să se determine locul în care ajunge într-adevăr un electron individual. Desigur, atunci când o situație este foarte complicată, noi nu ne dăm înapoi de la a folosi teoria probabilităților, adică, de la a calcula nişte şanse. Atunci când dăm cu zarul, din cauza diferitelor forțe de rezistență şi a atomilor şi a tuturor acelor chestii complicate, suntem perfect de acord că nu cunoaştem suficiente detalii pentru a face o predicție precisă; astfel încât, calculăm şansele ca un lucru să iasă aşa şi pe dincolo. Dar vă dați seama că, prin aceasta, noi impunem ipoteza existenței din start a unei probabilități; ipoteza prezenței şansei în cadrul legilor fundamentale ale fizicii.

Să presupunem că avem un experiment aranjat astfel încât, în absența luminii, să ne găsim în situație de interferență. Pe urmă, facem afirmația potrivit căreia, chiar şi în prezența luminii, tot nu putem preciza prin care fantă va trece un electron. Ştim doar că, de fiecare dată când ne uităm, el trece prin una din ele, dar nu avem cum să prevedem dinainte care va fi aceasta. Cu alte cuvinte, viitorul este impredictibil. Nu se poate prevedea, din nici o informație anterioară, în spatele cărei găuri va fi zărit lucrul respectiv. Atunci, dacă scopul originar al fizicii a fost – şi toată lumea aşa a crezut că a fost – să afle suficiente lucruri pentru a putea prezice ce urmează să se

întâmple în anumite circumstanţe date, înseamnă că, într-un anumit fel, fizica s-a lăsat păgubaşă. Iată circumstanţele: sursă de electroni, sursă puternică de lumină, placă de tungsten cu două fante; vreau să ştiu în spatele cărei găuri voi vedea electronul! Una din teorii este aceea potrivit căreia motivul pentru care nu putem prevedea aceasta, este că lucrurile sunt determinate de nişte chestii foarte complicate încă din start, de la sursă: există nişte angrenaje interne, nişte rotiţe etc., care hotărăsc fanta prin care va trece electronul. Probabilităţile ar fi jumi-juma deoarece, asemenea unui zar, este vorba de ceva aleatoriu; fizica este incompletă, iar dacă am elabora o fizică suficient de completă, am fi în stare să prevedem gaura prin care trece el. Aceasta este numită Teoria Variabilelor Ascunse. Teoria aceasta nu poate fi adevărată; nu din cauza lipsei de cunoştinţe detaliate nu putem noi face predicţii.

Am spus că dacă nu aprindem lumina, urmează să obţinem tiparul de interferenţă. Dacă avem o situaţie în care obţinem tiparul de interferenţă, atunci este imposibil să o analizăm în termeni de trecere prin fanta nr.1 sau prin fanta nr.2. Din cauza faptului că această curbă este atât de simplă, ea reprezintă, din punct de vedere matematic, un lucru complet diferit faţă de însumarea contribuţiilor celorlalte două curbe pentru a obţine probabilitatea totală. Dacă ne-ar fi posibil să determinăm prin ce fantă urmează să treacă electronul atunci când lumina este aprinsă, atunci n-ar mai conta cum este ea. Orice angrenaje vor fi existând în cadrul sursei, pe care să le observăm şi care să ne permită predicţia dorită, le-am putea observa şi cu lumina stinsă. În acest caz, am putea spune prin care fantă urmează să treacă electronul în cazul în care lumina este stinsă. Dar, dacă am fi capabili să facem asta, curba rezultantă ar trebui reprezentată ca sumă a celor două curbe corespunzătoare trecerii prin fanta nr.1 şi prin fanta nr.2. Şi nu este aşa. Prin urmare, în orice situaţie în care experimentul este aranjat astfel încât să producă interferenţă în absenţa luminii, este imposibil să avem dinainte vreo informaţie cu privire la fanta prin care urmează să treacă electronul, şi asta indiferent dacă lumina este stinsă sau aprinsă. Nu ignoranţa noastră cu privire la angrenajele interne, la complicaţiile interne, este cea care face ca natura să apară a avea în ea probabilitate: chestiunea pare a fi cumva intrinsecă. Cineva s-a exprimat astfel: „Nici măcar natura însăşi nu ştie în care parte o va lua electronul."

Un filosof a spus cândva: „Este necesar, pentru însăşi existenţa ştiinţei, ca aceleaşi condiţii să producă mereu aceleaşi rezultate." Ei bine, nu produc. Stabiliţi circumstanţele, cu aceleaşi condiţii de fiecare dată, şi nu puteţi prevedea prin care fantă va trece electronul. Şi totuşi, ştiinţa merge mai departe, în pofida faptului că aceleaşi condiţii nu produc mereu aceleaşi rezultate.

Faptul că nu putem prezice ce se va întâmpla exact, ne întristează. Întâmplător, am putea născoci o situație foarte serioasă şi periculoasă, în care omul *musai* să ştie, şi tot nu am putea prevedea. De exemplu, am putea ticlui – mai bine să nu, dar am putea-o face – un montaj în care să avem o celulă fotoelectrică în combinație cu un electron: dacă îl zărim în spatele fantei nr.1, lansăm bomba atomică şi declanşăm Al Treilea Război Mondial; dacă îl observăm în spatele fantei nr.2, încheiem tratate de pace şi mai amânăm un pic războiul. Atunci viitorul omenirii ar depinde de ceva ce nici toată ştiința din lume nu ar putea prevedea. Viitorul este impredictibil.

Ce este necesar „pentru însăşi existența ştiinței" şi care sunt caracteristicile naturii, constituie lucruri ce nu pot fi hotărâte prin condiții pompoase prestabilite, ci totdeauna prin însuşi materialul cu care lucrăm, natura. Privim, vedem ce descoperim, şi nu putem afirma cu succes dinainte cum o să arate lucrurile. Adeseori posibilitățile cele mai rezonabile se dovedesc a nu fi aşa. Dacă este ca ştiința să avanseze, ceea ce ne trebuie este abilitatea de a experimenta, onestitatea în raportarea rezultatelor – acestea trebuie raportate fără ca cineva să se pronunțe asupra modului în care şi-ar fi dorit să fie ele – şi, în fine – lucru important – inteligența de a interpreta rezultatele. Un aspect important legat de această inteligență este cel că nu trebuie să existe dinainte o siguranță privitoare la care trebuie să fie ele. Pot exista prejudecăți, şi se poate afirma „cutare lucru este puțin probabil" ori „cutare lucru îmi displace". Prejudecata este diferită de siguranța absolută. Nu este vorba de prejudecata absolută – doar de o anumită tendință. Atâta timp cât sunteți doar înclinați către ceva, nu este nici o problemă, pentru că dacă tendința dumneavoastră este greşită, o constantă acumulare de experimente nu vă va da nici o clipă pace până când nu le veți lua în considerare. Ele pot fi trecute cu vederea numai în cazul în care sunteți absolut siguri dinainte de vreo condiție prestabilită pe care ştiința trebuie s-o îndeplinească. În fapt, pentru însăşi existența ştiinței, este nevoie să existe minți care să nu accepte că natura trebuie să satisfacă anumite condiții preconcepute, precum cele ale filosofului nostru.

7
CĂUTÂND NOI LEGI

Ceea ce doresc să discut în această prelegere nu este, strict vorbind, caracterul legilor fizicii. Atunci când se vorbeşte despre legile fizicii, lumea pricepe cel puțin că este vorba despre natură. Însă eu nu vreau să vă vorbesc despre natură, ci mai curând despre poziția noastră actuală vizavi de ea. Vreau să vă spun ce credem noi că ştim, ce avem de ghicit, şi cum se procedează cu ghicitul. Cineva a sugerat că ar fi ideal ca, pe măsură ce avansez, să vă explic pe îndelete cum să ghiciți o lege, iar, în final, să vă ofer o lege nouă. Nu ştiu dacă voi fi în stare să fac asta.

Mai întâi, doresc să vă spun care este situaţia actuală, ce cunoaştem noi despre fizică. Ați putea crede că v-am spus deja totul, deoarece pe parcursul prelegerilor v-am prezentat toate marile principii cunoscute. Însă principiile trebuie să fie principii despre *ceva*; principiul conservării energiei se referă la energia a *ceva*, iar legile mecanicii cuantice reprezintă legi ale mecanicii cuantice în legătură cu *ceva*. Iar toate aceste principii luate laolaltă tot nu ne spun ce conținut are natura despre care discutăm. Aşadar, am să vă vorbesc un pic despre materialul asupra căruia se presupune că acționează ele.

În primul rând, avem materia. Şi, lucru destul de remarcabil, întreaga materie arată la fel. Se ştie că materia din care sunt făcute stelele este aceeaşi ca cea de pe Pământ. Caracterul luminii emise de aceste stele ne oferă un soi de amprentă digitală, pe baza căreia putem afirma că atomii existenți acolo sunt la fel ca cei de aici. Aceleaşi tipuri de atomi se vădesc atât în ființe cât şi în lucruri; broaştele sunt alcătuite din aceeaşi „țărână“ ca şi pietrele, doar că aranjată altfel. Deci acest lucru ne simplifică problema: nu avem nimic altceva decât atomi, aceiaşi, oriunde.

Atomii par toţi a avea aceeaşi structură generală. Ei prezintă un nucleu, iar în jurul nucleului există electroni. Vom alcătui o listă cu părţile constituente ale lumii, despre care credem noi că avem cunoştinţă (fig. 32).

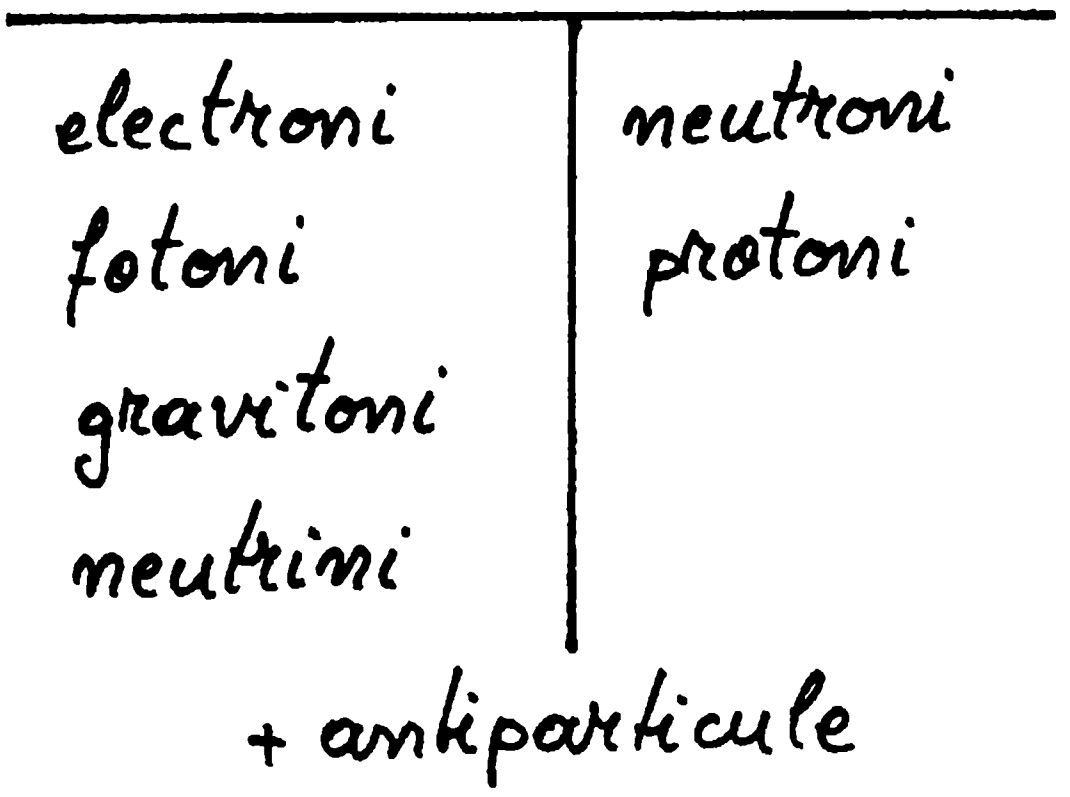


Figura 32

Mai întâi este vorba despre electroni, care reprezintă particulele de la periferia atomului. Apoi sunt nucleele; însă acestea sunt înţelese astăzi ca fiind alcătuite la rândul lor din două alte lucruri, pe care le numim neutroni şi protoni – două tipuri de particule. Ne uităm la stele, şi urmărim atomii, şi vedem că aceştia emit lumină, iar lumina este ea însăşi descrisă de nişte particule, pe care le numim fotoni. La început de tot am vorbit despre gravitaţie; iar dacă teoria cuantică este corectă, atunci gravitaţia ar trebui să prezinte un gen de unde, care şi ele să se comporte tot asemenea unor particule, iar acestea se numesc gravitoni. Dacă nu credeţi în aceştia, spuneţi-i simplu gravitaţie. În fine, am menţionat ceea ce se cheamă dezintegrare beta, în care un neutron trece într-un proton, un electron şi un neutrin – de fapt, un antineutrin; mai există o particulă, neutrinul. Pe lângă toate particulele enumerate există, desigur, toate antiparticulele lor; aceasta nu reprezintă decât o afirmaţie rapidă care are ca rezultat dublarea numărului de particule, însă ea nu introduce nici o complicaţie suplimentară.

Cu aceste particule pe care le-am enumerat, pot fi explicate, din câte ştim noi, toate fenomenele la energii joase – în fapt, toate fenomenele care se petrec oriunde în univers. Există şi excepţii, atunci când, ici şi colo, o particulă la energie foarte înaltă produce oarece fenomene; în laboratoare, am fost în stare să realizăm lucruri ciudate. Dar dacă lăsăm deoparte aceste cazuri speciale, toate fenomenele obişnuite pot fi explicate prin intermediul acţiu-

nilor şi mişcărilor particulelor. De exemplu, se presupune că, în principiu, însăşi viaţa poate fi înţeleasă pornind de la mişcările atomilor, iar aceşti atomi sunt alcătuiţi din neutroni, protoni şi electroni. Trebuie să adaug imediat că, atunci când afirm că în principiu o putem înţelege, nu vreau să spun decât că noi credem că, dacă am putea determina totul, am descoperi că nu trebuie aflat nimic nou în cadrul fizicii pentru a pătrunde fenomenul vieţii. O altă chestiune, faptul că stelele emit energie – energie solară, sau enrgie stelară – este de presupus a fi înţeleasă tot în termeni de reacţii nucleare între particule. Cel puţin atât cât ştim noi în prezent, orice tip de detalii cu privire la modul în care se comportă atomii, este descris cu acurateţe prin intermediul acestui gen de model. În fapt, aş putea spune că, din câte am eu cunoştinţă până acum, în domeniul fenomenelor de zi cu zi nu există nici unul care, în mod categoric, să nu poată fi explicat astfel, sau măcar în legătură cu care să plutească un mister profund.

Acest lucru nu a fost dintotdeauna posibil. Există, de exemplu, un fenomen numit supraconductivitate, care înseamnă că la temperaturi joase metalele conduc curentul electric fără a opune rezistenţă. La început nu a fost evident că acest fenomen este o consecinţă a legilor cunoscute. Acum, că el a fost analizat suficient de amănunţit, a devenit vizibil că poate fi în fapt explicat pe de-a-ntregul prin prisma cunoştinţelor noastre actuale. Avem însă şi alte fenomene, cum ar fi percepţia extrasenzorială, care nu pot fi explicate prin intermediul cunoştinţelor noastre de fizică. Totuşi, acesta din urmă nu a fost în mod categoric stabilit, şi nu avem garanţia că el există. Desigur, dacă ar putea fi demonstrat, aceasta ar dovedi că fizica este incompletă şi, ca atare, pentru fizicieni este extrem de important dacă el este corect sau greşit. Există multe experimente care arată că fenomenul nu ţine. Acelaşi lucru este valabil şi pentru influenţele astrologice. Dacă ar fi adevărat că stelele pot influenţa care anume este ziua propice de mers la dentist – în America avem genul ăsta de astrologie – atunci teoria fizică s-ar dovedi eronată, pentru că, în principiu, nu există nici un mecanism inteligibil, având la bază comportarea particulelor, care să facă să funcţioneze aşa ceva. Acesta este motivul pentru care printre oamenii de ştiinţă există un oarecare scepticism privitor la aceste idei.

Pe de altă parte, în cazul hipnotismului, atunci când la început a fost descris incomplet, a părut că el este imposibil. Acum, că este cunoscut mai bine, ne dăm seama că nu este imposibil ca hipnoza să apară pe calea unor procese fiziologice normale, chiar dacă necunoscute încă; în mod evident, ea nu reclamă vreun gen nou şi aparte de forţă.

Astăzi, teoria noastră cu privire la ce se întâmplă în afara nucleului unui atom pare suficient de precisă şi completă, în sensul că putem calcula orice, cu oricâtă precizie dictată de măsurări, cu condiţia să avem suficient timp la dispoziţie. În schimb, se dovedeşte că forţele dintre neutroni şi protoni – constituenţii nucleului – nu sunt pe deplin cunoscute şi nu sunt deloc bine înţelese. Vreau să spun că, în prezent, nu înţelegem forţele dintre neutroni şi protoni într-o asemenea măsură încât, dacă mi-aţi cere de pildă să calculez cu exactitate nivelurile energetice ale carbonului, sau ceva de genul acesta, şi dacă mi-aţi oferi răgazul şi memoria de calculator suficiente, eu să pot face aceasta. Nu avem suficiente cunoştinţe. Deşi pentru nivelurile energetice ale electronilor de la periferia atomului putem face acest lucru, pentru nucleu nu putem, căci forţele nucleare încă nu sunt înţelese foarte bine.

Pentru a afla mai multe în această privinţă, experimentatorii au purces la studierea fenomenelor de la energii înalte. Ei izbesc neutroni şi protoni unii de alţii la energii foarte mari, pentru a produce chestii ciudate, din al căror studiu speră să înţeleagă mai bine forţele dintre neutroni şi protoni. Aceste experimente au deschis cutia Pandorei! Deşi tot ce ne doream era o viziune mai bună asupra acestor forţe, am descoperit că, atunci când ciocnim puternic lucrurile respective unele de altele, în lume există mai multe particule. În fapt, în încercarea noastră de a da de cap acestor forţe, au fost scoase la iveală mai mult de patru duzini de noi particule. Pe acestea le vom trece în rubrica neutron/proton (fig. 33), deoarece ele interacţionează cu neutronii şi protonii, şi au cumva de-a face cu forţele dintre aceştia. În plus, pe când săpam de zor la ele, am dat peste două elemente care nu sunt relevante pentru problema forţelor nucleare: unul din ele se numeşte mezon miu, sau miuon, iar celălalt este un neutrin corespunzător. Există două feluri de neutrini: unul care corespunde electronului, şi un altul care corespunde mezonului miu. Întâmplător, actualmente se cunosc toate legile miuonului şi ale neutrinului său şi, în mod cât se poate de uimitor, ele spun că, atât cât ştim noi din punct de vedere experimental, aceştia se comportă absolut la fel ca electronul şi neutrinul său, cu singura excepţie că masa mezonului miu este de 207 ori mai mare decât a electronului. Aceasta constituie singura deosebire cunoscută dintre aceste obiecte, ceea ce este cât se poate de curios.

Patru duzini de particule înseamnă un şir înspăimântător... plus anti-particulele corespunzătoare. Ele poartă diferite nume: mezoni, pioni, kaoni, lambda, sigma... nu contează... la patru duzini de particule, o să fie o sumedenie de nume! Însă se dovedeşte că ele vin în familii, ceea ce ne ajută puţin. De fapt, unele din aceste aşa-numite particule dăinuiesc atât de puţin, încât

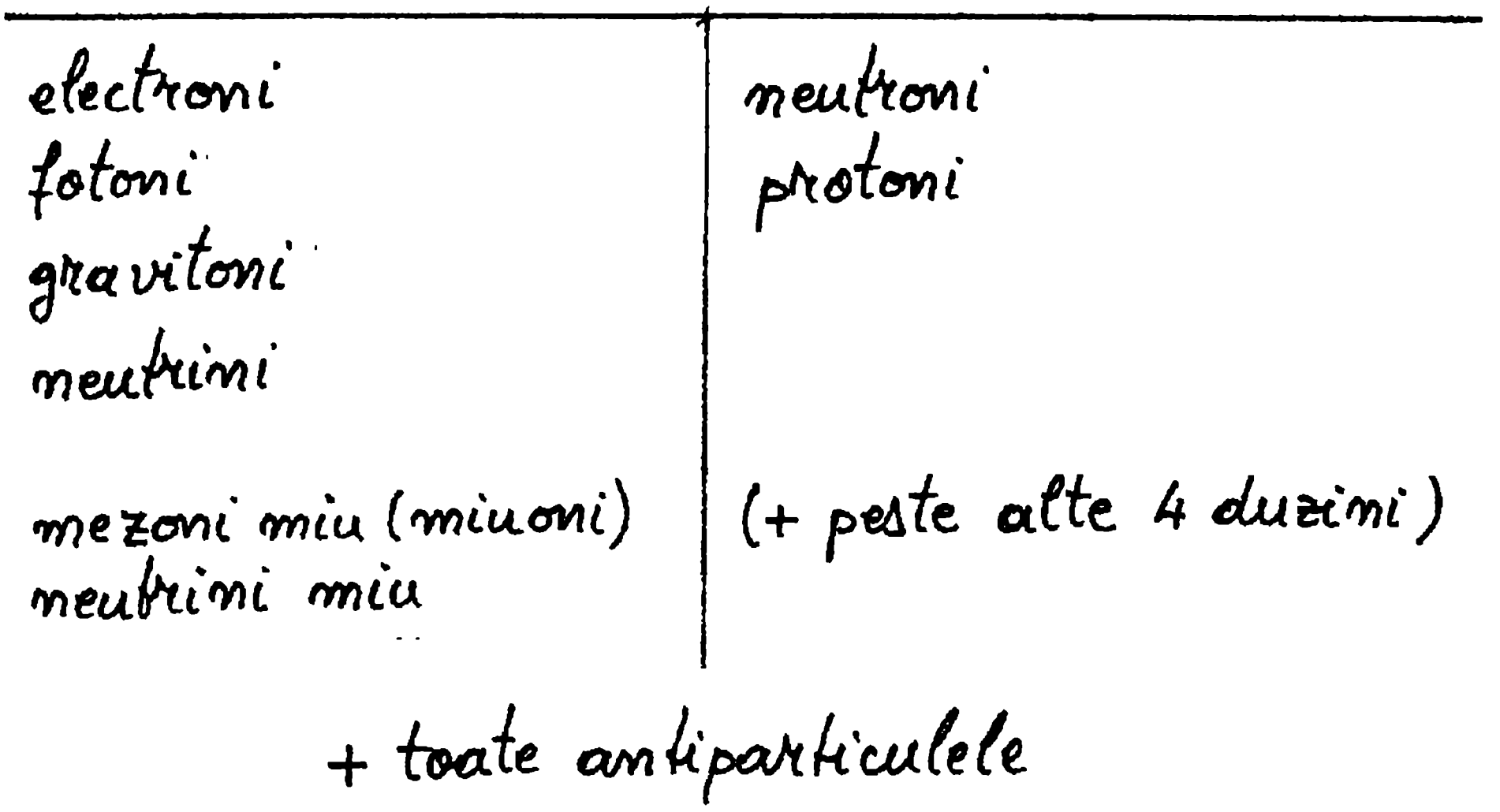


Figura 33

se nasc discuţii dacă este posibil sau nu de definit în fapt însăşi existenţa lor, însă nu voi intra în această dezbatere.

Pentru a ilustra ideea de familie, voi considera cazurile unui neutron şi unui proton. Aceştia au aceeaşi masă, cu o exactitate de circa o zecime de procent. Unul este de 1836 şi celălalt de 1839 de ori mai greu decât electronul. Şi mai remarcabil încă este faptul că, din punctul de vedere al forţelor nucleare, al forţelor tari din interiorul nucleului, forţa dintre doi protoni este aceeaşi ca cea dintre un proton şi un neutron, şi ca cea dintre doi neutroni. Cu alte cuvinte, din perspectiva forţelor nucleare tari, protonul şi neutronul nu pot fi deosebiţi. Deci avem o lege de simetrie: neutronii pot fi înlocuiţi cu protoni, fără a schimba ceva... cu condiţia să ne referim doar la forţele tari. Dar dacă înlocuiți un neutron cu un proton, aveți o deosebire teribilă, căci protonul poartă o sarcină electrică, iar neutronul nu. Prin măsurători electrice se poate observa imediat diferența dintre un proton şi un neutron, deci această simetrie, în care ceva se poate înlocui cu altceva, este ceea ce noi numim o simetrie aproximativă. Ea este corectă pentru interacțiunile tari ale forţelor nucleare, dar este incorectă în orice sens profund al naturii, deoarece nu este valabilă pentru electricitate. Li se spune simetrii parțiale, şi avem mult de furcă cu ele.

Acum că familiile au fost extinse, se dovedeşte că substituții de genul neutronului în locul protonului pot fi aplicate unei game largi de particule. Dar acuratețea este încă şi mai scăzută. Afirmația că neutronii pot fi înlocuiți totdeauna cu protoni este doar aproximativă – nu este adevărată în cazul

electricității – iar substituțiile mai largi care s-a descoperit că sunt posibile, oferă o simetrie încă şi mai slabă. Totuşi, aceste simetrii parțiale au ajutat la gruparea particulelor în familii şi la identificarea în acest fel a locurilor unde lipsesc particule, contribuind la descoperirea unora noi.

Acest soi de joc, de a ghici în mare relații de înrudire şi aşa mai departe, este sugestiv pentru genul de meci amical preliminar pe care cineva îl poartă cu natura mai înainte de a descoperi propriu-zis anumite legi profunde şi fundamentale. În istoria recentă a ştiinței se găsesc exemple foarte importante. De pildă, descoperirea de către Mendeleev* a tabelului periodic al elementelor este analoagă acestui joc. Ea reprezintă primul pas; însă descrierea completă a motivului existenței acestuia a venit mult mai târziu, odată cu teoria atomului. În acelaşi fel, acum câțiva ani, Maria Mayer şi Jensen** au organizat cunoştințele despre nivelurile energetice în nucleu, în ceea ce ei au numit modelul în pături al nucleului. Fizica se află într-un astfel de meci, în care, prin ghiciri aproximative, se realizează o reducere a complexității.

Pe lângă aceste particule, avem toate principiile despre care am vorbit înainte: principiul simetriei, cel al relativității, cel că lucrurile trebuie să se comporte în maniera mecanicii cuantice; şi, combinându-l pe acesta din urmă cu relativitatea, cel că toate legile de conservare trebuie să fie locale.

Dacă punem laolaltă toate aceste principii, descoperim că ele sunt prea multe. Sunt inconsistente între ele. Se pare că, dacă luăm mecanica cuantică, plus relativitatea, plus enunțul că totul trebuie să fie local, plus o serie de presupuneri tacite, ajungem la inconsistență, căci, pentru diferite lucruri pe care le calculăm, obținem valori infinite; dacă ne dă infinit, cum să mai susținem noi că acestea sunt în concordanță cu natura? Un exemplu de astfel de presupuneri tacite, în legătură cu care avem prea multe prejudecăți pentru a înțelege adevărata lor semnificație, îl constitutie o afirmație precum următoarea: în cazul în care calculăm şansele pentru toate posibilitățile – să zicem, 50% să se întâmple asta, 25% să se întâmple aia, etc. – suma lor ar trebui să dea 1. Noi credem că dacă se adună toate variantele, obținem probabilitate 100%. Pare rezonabil, însă necazul este tocmai cu lucrurile rezonabile. O altă astfel de propoziție este aceea că energia a ceva trebuie să fie totdeauna pozitivă – nu poate fi negativă. Un alt enunț care este probabil introdus înainte de a

---

* Dimitri Ivanovici Mendeleev, 1834-1907, chimist rus.

** Maria Mayer, fizician american, premiul Nobel pentru fizică în 1963; din 1960, profesor de fizică la Universitatea California. Hans Daniel Jensen, fizician german, premiul Nobel pentru fizică în 1963; din 1949, director al Institutului de Fizică Teoretică de la Heidelberg.

obține inconsistență, este cel pe care îl numim cauzalitate, ceva de genul ideii că efectele nu pot să preceadă cauzele. Efectiv nimeni nu a realizat vreun model care să nu ia în considerare afirmația despre probabilități, ori cauzalitatea, şi care, în acelaşi timp, să fie consistent cu mecanica cuantică, cu relativitatea, cu caracterul local şi aşa mai departe. Deci, efectiv, nu ştim precis care presupunere anume ne creează problema cu obținerea infiniților. Iată o întrebare drăguță! Totuşi, se dovedeşte că, printr-un anumit artificiu brutal, putem mătura infiniții sub covor, fiind astfel temporar în stare să ne continuăm calculele.

O.K. Aceasta este situația actuală. Acum vă voi vorbi despre cum ar urma să căutăm noi legi.

În general, căutăm o lege nouă pe următoarea cale. Mai întâi o ghicim. Apoi calculăm consecințele acesteia, pentru a vedea ce ar implica noua lege în cazul în care am ghicit corect. Apoi comparăm rezultatul calculelor cu natura, cu experimentul sau cu experiența; îl comparăm direct cu observațiile, pentru a vedea dacă el concordă. Dacă nu se potriveşte cu experimentul, legea este greşită. În această simplă afirmație stă cheia ştiinței. Nu contează cât de frumos ai ghicit legea. Nu contează cât este de deştept cel care a ghicit-o, sau cum îl cheamă – dacă nu concordă cu experimentul, ea este greşită. Asta-i tot. Este adevărat că, pentru a ne asigura că este greşită, trebuie să verificăm puțin dacă nu cumva cel care a efectuat experimentul l-a raportat incorect, sau dacă nu a existat cumva în cadrul experimentului vreun aspect neluat în seamă, vreun zgomot de fond ceva, ori dacă nu cumva cel care a calculat consecințele a comis vreo eroare de analiză, chiar dacă el este acelaşi cu cel ce a ghicit legea. Acestea sunt remarci evidente, aşa încât, atunci când afirm că legea nu concordă cu experimentul, că este greşită, vreau să spun că în fapt ea nu se potriveşte după ce experimentul a fost foarte atent verificat, după ce calculele au fost verificate, şi după ce lucrurile au fost întoarse de mai multe ori pe toate fețele, pentru a ne asigura de logica concluziilor pe care le-am tras pornind de la ipoteză.

Aceasta v-ar putea face să vă formați o părere oarecum eronată despre oamenii de ştiință. Se lasă impresia că noi o ținem tot într-un ghicit de posibilități, pe care să le comparăm cu experimentul, ceea ce ar pune experimentul pe un plan secundar. În fapt, experimentatorii au o anumită trăsătură particulară: lor le place să facă experimente chiar dacă nimeni nu a ghicit încă ceva şi, foarte adesea, ei le efectuează în domenii despre care se ştie că teoreticienii

nu au ghicit încă nimic. De exemplu, am putea cunoaşte o groază de legi, dar să nu ştim dacă ele sunt într-adevăr valabile la energii înalte. Valabilitatea lor la energii înalte constituie doar o presupunere rezonabilă. Experimentatorii au încercat experimente la energii mai înalte şi, din când în când, câte unul din ele ne face necazuri; adică, el ne face să descoperim că lucruri pe care le credeam corecte, sunt în fapt greşite. Din această perspectivă, experimentul poate produce rezultate neaşteptate, care să ne facă să o luăm de la capăt cu ghicitul. Un exemplu de rezultat neaşteptat îl constituie cel al mezonul miu şi neutrinului său, care nu au fost ghiciți de absolut nimeni mai înainte de a fi descoperiți. Chiar şi astăzi, nimeni nu a produs încă vreo metodă de a ghici, prin intermediul căreia aceştia să rezulte în mod natural.

Vă dați seama, desigur, că, în felul acesta, noi putem încerca să invalidăm orice teorie bine precizată. Dacă avem o teorie pusă la punct, o conjectură autentică, din care putem calcula în mod convenabil consecințe ce pot fi comparate cu experimentul, atunci, în principiu, putem demonta orice astfel de teorie. Există totdeauna posibilitatea de a demonstra că orice teorie bine precizată este greşită; dar, atenție, nu putem niciodată demonstra că ea este corectă. Să presupunem că avansăm o ipoteză fructoasă, îi calculăm consecințele, şi descoperim că ele concordă de fiecare dată cu experimentul. Este atunci teoria corectă? Nu, pur şi simplu ea nu este dovedită greşită. În viitor ați putea calcula un domeniu mai larg de consecințe, ar putea exista un domeniu mai larg de experimente, şi am putea descoperi atunci că lucrul respectiv este greşit. Acesta este motivul pentru care legile lui Newton cu privire la mişcarea planetelor au dăinuit atâta vreme: el a ghicit Legea Atracției Universale, a calculat tot felul de consecințe cu privire la un sistem etc., le-a comparat apoi cu experimentul… şi a durat mai multe sute de ani până când să fie observată uşoara eroare existentă în mişcarea planetei Mercur.

În tot acest timp teoria nu a fost dovedită ca greşită, şi a putut fi luată temporar drept bună. Dar nu s-a putut niciodată dovedi corectă, pentru că poate a doua zi un experiment ar fi reuşit să demonstreze că ceea ce credeam că este corect, este de fapt eronat. Niciodată nu avem dreptate în mod categoric; absolut siguri nu putem fi decât de faptul că greşim. Totuşi, este cât se poate de remarcabil modul în care putem avea unele idei care să dăinuiască atât de mult.

Una din căile de a stopa ştiința ar fi de a efectua experimente numai în regiunea în care se cunoaşte legea. Dar experimentatorii caută cu cea mai mare râvnă şi cu cea mai multă trudă exact în acele locuri în care pare cel mai probabil să putem demonstra că teoriile noastre sunt greşite. Cu alte

cuvinte, încercăm să dovedim singuri cât putem de repede că nu avem dreptate, pentru că acesta este singurul fel în care putem avansa. De exemplu, în ziua de astăzi nu prea ştim unde să căutăm necazuri în domeniul fenomenelor la energii joase; suntem de părere că totul este în ordine. Ca atare, nu există nici un proiect de amploare care să caute necazuri în cadrul reacţiilor nucleare sau al supraconductibilităţii. În aceste prelegeri, eu mă axez pe descoperirea de legi fundamentale. Ansamblul domeniului de interes al fizicii include şi o înţelegere la un alt nivel a unor asemenea fenomene precum supraconductibilitatea şi reacţiile nucleare, în termeni de legi fundamentale. Însă aici este vorba despre descoperirea unor necazuri, despre ceva în neregulă cu legile fundamentale. Şi cum nimeni nu ştie unde să caute printre fenomenele de la energii joase, toate experimentele din ziua de azi cu privire la găsirea unei noi legi se desfăşoară la energii înalte.

Un alt lucru pe care trebuie să-l subliniez, este că o teorie vagă nu poate fi dovedită greşită. Dacă lucrul ghicit este exprimat în mod evaziv şi mai degrabă neclar, iar dacă metoda folosită pentru determinarea consecinţelor este un pic ambiguă – nu sunteţi siguri, şi spuneţi: „cred că totul este în regulă, pentru că se datorează cutărui şi cutărui fapt, iar lucrul acesta şi lucrul acela au mai mult sau mai puţin ca efect asta şi aia, şi bănuiesc că pot cât de cât explica cum funcţionează chestia respectivă…“ – ei bine, constataţi atunci că teoria dumneavoastră este bună, pentru că nu poate fi dovedită eronată! De asemenea, dacă procedeul de calcul al consecinţelor este neprecizat, atunci, cu puţină îndemânare, orice rezultate experimentale pot fi făcute să arate precum consecinţele aşteptate. Probabil că sunteţi obişnuiţi cu acest lucru din alte domenii. „A“ îşi urăşte mama. Motivul este, desigur, acela că ea nu l-a mângâiat sau nu l-a iubit suficient atunci când era copil. Dar, dacă faceţi investigaţii, descoperiţi că de fapt ea l-a iubit foarte mult şi totul a fost în ordine. Păi, atunci, este din cauză că a fost prea indulgentă cu el când era mic! Dintr-o teorie vagă se poate obţine orice rezultat. Tratamentul pentru acest lucru este următorul. Dacă ar fi posibil să se formuleze cu precizie, dinainte, cât anume înseamnă iubire insuficientă şi cât înseamnă iubire prea indulgentă, atunci ar fi o teorie perfect legitimă, care ar putea fi supusă testărilor. Atunci când se pune în discuţie acest lucru, răspunsul obişnuit este: „atunci când avem de-a face cu chestiuni psihologice, lucrurile nu pot fi definite atât de exact“. Da, dar atunci nu poţi avea pretenţia că ştii ceva despre chestiunile respective.

Veţi fi îngroziţi să aflaţi că avem exemple exact de acest gen în fizică. Avem aceste simetrii aproximative, care cam aşa funcţionează. Se ia o simetrie

aproximativă, şi se calculează o serie de consecinţe ca şi când ar fi perfectă. Atunci când ele se compară cu experimentul, nu concordă. Bineînţeles; rezultatul care este de aşteptat este aproximativ. Deci, în cazul în care concordanţa este bunicică, spunem: „Drăguţ!"; pe când, dacă ea este foarte slabă, spunem: „Ei bine, înseamnă că acel anumit aspect este foarte sensibil în raport cu eşecul simetriei." S-ar putea să râdeţi, dar exact aşa suntem noi nevoiţi să avansăm. Atunci când ne apucăm de un subiect nou – iar aceste particule constituie ceva nou – tatonările acestea, modul acesta de a ghici bazat pe „fler", reprezintă începutul oricărei ştiinţe. Acelaşi lucru pe care l-am spus despre psihologie este valabil şi pentru enunţul simetriei în fizică, aşa încât să nu râdeţi prea tare de el. La început este necesar să fim extrem de atenţi. Cu acest gen de teorie vagă se poate foarte uşor cădea în hău; este greu de dovedit că ea este greşită, şi îţi trebuie o oarecare îndemânare pentru a merge ca pe bârnă în acest joc.

În acest proces al ghicirii, al calculării consecinţelor şi al comparării cu experimentul, ne putem împotmoli în diverse stadii. Ne putem împotmoli în etapa ghicirii, atunci când nu ne vine nici o idee. Sau ne putem împotmoli în etapa calculării. De exemplu, în 1934, Yukawa* a avansat o idee referitoare la forţele nucleare, dar nimeni nu a putut să calculeze consecinţele, pentru că matematica era prea dificilă, şi astfel nu s-a putut compara ideea cu experimentul. Teoria a rămas aşa vreme îndelungată, până când am descoperit toate aceste particule în plus neîntrevăzute de Yukawa şi, ca atare, în mod neîndoios, lucrurile nu sunt atât de simple cum şi le-a imaginat el. Un alt loc în care ne putem împotmoli este la capătul experimental. De exemplu, teoria cuantică a gravitaţiei avansează foarte greu, dacă nu din alt motiv, atunci măcar din cauza faptului că toate experimentele care pot fi efectuate nu implică niciodată în mod simultan mecanica cuantică şi gravitaţia. Forţa gravitaţiei este prea slabă în comparaţie cu cea electrică.

Din cauza faptului că sunt fizician teoretician, şi că mă încântă mai mult celălalt capăt al problemei, doresc să mă concentrez acum asupra modului în care se ghiceşte.

Aşa cum am spus mai înainte, nu are nici o importanţă care este sursa ghicitului; nu contează decât ca el să concorde cu experimentul şi să fie cât

---

* Hideki Yukawa, fizician japonez, director al Institutului de Cercetări în Domeniul Fizicii Fundamentale, din Kyoto; Premiul Nobel pentru fizică în 1949.

mai bine precizat posibil. „Atunci," veți spune dumneavoastră, „este foarte simplu. Programați o mașinărie, un calculator imens, astfel încât să genereze o succesiune aleatorie de ipoteze și, de fiecare dată când ghicește cum ar trebui să funcționeze natura, să calculeze imediat consecințele, iar apoi să le compare cu o listă de rezultate experimentale, furnizată dinainte." Cu alte cuvinte, ghicitul este ocupația prostului. De fapt, este absolut contrariul, și voi încerca să vă explic de ce.

Prima problemă este cum să începi. Spui: „Păi, aș începe cu toate principiile cunoscute." Da, dar toate principiile cunoscute sunt inconsistente unele cu altele, deci trebuie renunțat la ceva. Primim o sumedenie de scrisori de la oameni care insistă că ar trebui să lăsăm în teoriile noastre spații libere. Înțelegeți dumneavoastră, să facem găuri în care să încapă noi idei. Vine cineva și zice: „Știți, voi, oameni buni, afirmați mereu că spațiul este continuu. De unde știți, atunci când ajungeți la o dimensiune suficient de mică, că există într-adevăr destule puncte intermediare, că nu este de fapt vorba de o mulțime de puncte separate între ele prin distanțe mici?" Sau zice: „Știți, amplitudinile acelea din mecanica cuantică, despre care ne vorbiți, sunt atât de complicate și de absurde; ce vă face să credeți că sunt corecte? Poate nu sunt." Astfel de remarci sunt evidente, și oricine lucrează în domeniu este perfect conștient de ele. Scoaterea lor în evidență nu servește la nimic. Problema nu este doar ce ar putea fi greșit, ci și cu ce anume exact ar putea fi înlocuit. În cazul spațiului continuu, să presupunem că enunțul exact este acela că spațiul chiar constă dintr-o serie de puncte, și că între ele noțiunea de spațiu nu are nici un înțeles, și că punctele sunt dispuse într-o rețea cubică. Atunci putem demonstra imediat că el este fals. Nu merge. Problema nu este doar să spui că ceva este greșit, ci să și înlocuiești cu altceva – iar asta nu-i ușor. Imediat ce o idee cu adevărat bine precizată este înlocuită, devine vizibil faptul că nu merge.

A doua dificultate este aceea că există un număr infinit de posibilități de tipul acesta simplu. Este ceva de genul următor. Vă munciți din greu, de multă vreme, să deschideți un seif. Și vine un oarecare care nu se pricepe de nici un fel la asta, cu excepția faptului că înțelege că vreți să deschideți un seif, și zice: „De ce nu încercați combinația 10-20-30?" Ocupându-vă cu asta, dumneavoastră ați încercat multe lucruri; poate că ați încercat deja și combinația 10-20-30. Sau poate că știți deja că numărul din mijloc este 32, nu 20. Sau poate că știți clar că este vorba de o combinație de cinci cifre... Așa încât, vă rog, nu îmi mai trimiteți scrisori în care să îmi spuneți cum urmează să funcționeze lucrurile. Le citesc – totdeauna le citesc, pentru a mă asigura

că m-am gândit deja la ceea ce se sugerează acolo – dar durează prea mult să răspund la ele, deoarece de obicei intră în categoria „încearcă 10-20-30". Aşa cum am văzut din celelalte teorii subtile şi profunde, imaginaţia naturii o depăşeşte de obicei cu mult pe a noastră. A ghici ceva atât de subtil şi de profund nu este aşa uşor. Trebuie să fii cu adevărat isteţ ca să ghiceşti, şi nu o poţi face orbeşte, ca o maşină.

Doresc să discut acum despre arta de a ghici legi ale naturii. Este o artă. Cum se practică ea? Una din căile care ar putea fi sugerate ar fi să privim în istorie, pentru a vedea cum au făcut-o tipii ceilalţi. Deci să privim istoria.

Trebuie să începem cu Newton. El s-a aflat într-o situaţie în care dispunea de cunoştinţe incomplete, şi a fost în stare să ghicească legile punând laolaltă idei care erau relativ apropiate de experiment; nu exista o distanţă mare între observaţii şi testări. Aceasta a fost prima modalitate, dar astăzi ea nu funcţionează atât de bine.

Următorul tip care a realizat ceva măreţ a fost Maxwell, care a obţinut legile electricităţii şi magnetismului. El a pus laolaltă toate legile electricităţii datorate lui Faraday şi altora de dinaintea lui, le-a contemplat şi a realizat că erau inconsistente din punct de vedere matematic. Ca să îndrepte lucrurile, a trebuit să adauge un termen unei ecuaţii. A făcut aceasta inventându-şi un model de pinioane şi ambreiaje şi alte angrenaje în spaţiu. A găsit care era legea... dar nimeni nu i-a acordat prea mare atenţie, pentru că nu credeau în rotiţele lui. Nici noi nu credem astăzi în ele, dar ecuaţiile pe care le-a obţinut sunt bune. Deci se poate ca logica să fi fost greşită, dar rezultatul a fost corect.

În cazul relativităţii, descoperirea a fost complet diferită. Exista o acumulare de paradoxuri; legile cunoscute dădeau rezultate greşite. Acesta era un gen nou de gândire, o gândire în termeni de discutare a posibilelor simetrii ale legilor. Era în mod special dificil, din cauză că pentru prima dată se realiza cât de mult timp păruse corect ceva precum legile lui Newton, care totuşi, în ultimă instanţă, erau greşite. De asemenea, era dificil de acceptat că noţiunile obişnuite de spaţiu şi timp, care păreau atât de instinctuale, puteau fi greşite.

Mecanica cuantică a fost descoperită pe două căi independente, ceea ce constituie o lecţie. Aici, încă o dată şi chiar într-o mai mare măsură, au fost descoperite experimental un număr enorm de paradoxuri, lucruri ce nu puteau fi explicate absolut în nici un fel prin intermediul a ceea ce se ştia. Nu deoarece cunoştinţele erau incomplete, ci pentru că erau prea complete. Preziceai că ar trebui să se întâmple cumva... şi nu se întâmpla. Cele două drumuri au

fost cel al lui Schrödinger, care a ghicit ecuaţia, şi cel al lui Heisenberg, care a argumentat că trebuie analizat ceea ce este măsurabil. Aceste două metode filosofice diferite au condus în final la aceeaşi descoperire.

Mai recent, descoperirea legilor dezintegrării slabe, despre care am vorbit, cea în care un neutron trece într-un proton, un electron şi un antineutrin – legi care încă sunt doar parţial cunoscute – se constituie într-o situaţie oarecum diferită. De această dată ne aflăm în condiţiile unei cunoaşteri incomplete, şi a fost ghicită numai ecuaţia. Dificultatea deosebită în acest caz a fost aceea că toate experimentele erau greşite. Cum să ghiceşti răspunsul corect dacă, atunci când calculezi rezultatul, el nu concordă cu experimentul? Îţi trebuie curaj să afirmi că experimentul este greşit. Am să vă explic mai încolo de unde provine acest curaj.

Astăzi nu avem paradoxuri... cred. Avem aceşti infiniţi care apar atunci când punem toate legile laolaltă, dar cei care mătură gunoiul sub covor sunt atât de isteţi încât uneori pare a nu fi un paradox grav. Încă o dată, faptul că am descoperit toate aceste particule nu ne spune nimic altceva decât că ceea ce cunoaştem este incomplet. Sunt sigur că, aşa cum vă puteţi da seama din exemplele pe care vi le-am oferit, în fizică istoria nu se repetă. Motivul este următorul. Orice schemă – cum ar fi „gândeşte-te la legile de simetrie", sau „pune informaţia sub formă matematică", sau „ghiceşte ecuaţia" – este actualmente cunoscută tututror, şi ele sunt încercate toate mereu. Atunci când te împotmoleşti, răspunsul nu poate fi unul din acestea, deoarece le vei fi încercat imediat.

Data viitoare trebuie să existe o altă cale. De fiecare dată când ne blocăm cu prea multe necazuri şi prea multe probleme, este din cauză că metodele pe care le folosim sunt la fel cu cele pe care le-am mai folosit. Următoarea schemă, noua descoperire, va fi realizată într-o manieră complet diferită. Deci istoria nu ajută prea mult.

Aş dori să spun câteva cuvinte despre ideea lui Heisenberg, că nu are rost să se vorbească despre ceea ce nu se poate măsura. Mulţi discută despre această idee, fără să o înţeleagă cu adevărat. Ea poate fi interpretată în sensul că invenţiile şi construcţiile făcute trebuie să fie de o atare natură încât consecinţele care se calculează să poată fi comparate cu experimentul. Adică, să

---

* Erwin Schrödinger, fizician teoretician austriac, premiul Nobel pentru fizică în 1933, alături de Paul Dirac.

nu se calculeze o consecință de genul „un hâr trebuie să aibă valoarea de 3 mâri“, dacă nimeni nu ştie ce este aia un hâr sau un mâr. În mod evident, aşa ceva nu ajută la nimic. Însă, dacă se pot compara consecințele cu experimentul, altceva nu ne mai trebuie. Nu contează dacă în ghicit intervin hâri şi mâri. Poţi introduce oricâte prostii doreşti, cu condiția ca toate consecințele să poată fi comparate cu experimentul. Acest lucru nu este totdeauna apreciat la justa sa valoare. Lumea se plânge adesea de extinderea nejustificată a noțiunilor de particulă, traiectorie, etc, la nivelul atomic. Nu este câtuşi de puțin aşa; nu este nimic nejustificat în legătură cu extinderea. Este necesar şi bine să le extindem cât de departe putem dincolo de ceea ce ştim deja, dincolo de acele idei pe care le-am obținut deja; şi chiar facem asta mereu. Periculos? Da. Nesigur? Da. Însă este singurul mod de a avansa. Chiar dacă este nesigur, este necesar să facem utilă ştiința. Ştiința este folositoare numai dacă ne spune ceva despre anumite experimente care nu au fost efectuate; dacă ne spune doar ceea ce tocmai s-a petrecut, ea nu ajută la nimic. Trebuie să extindem ideile dincolo de domeniul în care ele au fost testate. De exemplu, legea Legea Atracţiei Universale, care a fost elaborată pentru a înțelege mişcarea planetelor, ar fi fost fără rost dacă Newton s-ar fi mulţumit să rostească „pricep acum cum e cu planetele“ şi nu s-ar fi simțit îmboldit să o verifice în privința atracției exercitate de Pământ asupra Lunii, şi dacă alți oameni de după el nu ar fi spus: „poate că ceea ce ține galaxiile laolată este gravitația“. Trebuie să încercăm asta. Aţi putea spune: „Atunci când ajungem la scara galaxiilor, din moment ce nu ştim nimic despre acestea, este posibil orice.“ Ştiu, dar spiritul ştiinței este de a nu accepta acest tip de limitare. Nu există o înțelegere absolută a galaxiilor. Pe de altă parte, dacă se admite că întreaga comportare este datorată numai legilor cunoscute, această presupunere este foarte limitată şi bine precizată, şi poate fi uşor infirmată de experiment. Ceea ce căutăm noi sunt tocmai astfel de ipoteze, foarte precis definite şi uşor de comparat cu experimentul. Rămâne faptul că modul în care se comportă până acum galaxiile pare să nu contrazică ipoteza.

Vă mai pot da un exemplu, încă şi mai interesant şi important. Probabil că cea mai puternică presupunere singulară ce contribuie din plin la progresul biologiei, este aceea că tot ce pot să facă animalele, pot face şi atomii: că lucrurile pe care le observăm în cadrul lumii biologice sunt rezultatul comportării fenomenelor fizice şi chimice, fără „ceva în plus“. Aţi putea oricând spune: „Atunci când este vorba despre ființe, este posibil orice.“ Asta dacă acceptaţi că nu veți înțelege niciodată ființele. Este foarte greu de crezut că unduirile tentaculelor caracatiței nu reprezintă nimic altceva decât un capriciu

al atomilor, în acord cu legile cunoscute ale fizicii. Însă atunci când ele sunt investigate pornind de la această ipoteză, se pot face presupuneri destul de exacte în legătură cu modul lor de funcționare. Astfel, se progresează mult pe calea înțelegerii. Până acum, nu s-a descoperit că ideea ar fi greşită... şi deci nu i-au fost retezate tentaculele.

Nu este neştiințific să ghiceşti, deşi mulți din cei care nu lucrează în domeniu cred că este. Acum câțiva ani, am purtat o conversație cu o persoană fără pregătire de specialitate, pe tema farfuriilor zburătoare – fiind om de ştiință, ştiu totul despre farfuriile zburătoare! „Nu cred că există farfurii zburătoare“, am spus eu. Aşa încât interlocutorul meu a replicat: „Este oare imposibil să existe farfurii zburătoare? Puteți demonstra că este imposibil?“ „Nu“, am răspuns eu, „nu pot demonstra că este imposibil. Pur şi simplu este doar foarte puțin probabil.“ La care el mi-a zis: „Vă purtați foarte neştiințific. Cum puteți susține că este puțin probabil, dacă nu puteți demonstra că este imposibil?“ Dar tocmai *asta* înseamnă să te porți ştiințific. Ştiințific este să afirmi ce este mai probabil şi ce este mai puțin probabil, şi nu să demonstrezi tot timpul posibilul şi imposibilul. Pentru a preciza la ce mă refer, aş fi putut spune: „Ascultă, vreau să zic că, după cunoştințele mele referitoare la lumea din jur, cred că este mult mai probabil ca rapoartele de farfurii zburătoare să fie rezultatul ştiutelor trăsături irației ale inteligențelor terestre, decât cel al unor neştiute eforturi rației depuse de nişte inteligențe extraterestre.“ Pur şi simplu este mai probabil, asta-i tot. Este o ipoteză viabilă. Şi întotdeauna noi încercăm să ghicim explicația cea mai probabilă, fără a uita că, dacă ea nu merge, atunci trebuie să discutăm celelalte posibilități.

Cum să ghicim ce anume să păstrăm şi la ce să renunțăm? Dispunem de toate aceste principii frumoase şi fapte cunoscute, dar ne aflăm într-un fel de impas: fie obținem infiniți, fie nu obținem o descriere mulțumitoare – ceva ne scapă. Uneori aceasta înseamnă că trebuie să renunțăm la anumite idei; în trecut, cel puțin, s-a dovedit mereu că vreo idee adânc înrădăcinată a trebuit abandonată. Întrebarea este, ce să abandonezi şi ce nu. Să renunți la tot este cam exagerat, şi nu îți mai prea rămâne cu ce să lucrezi. În definitiv, conservarea energiei arată bine, şi este frumoasă, şi nu vreau să renunț la ea. A ghici ce să păstrezi şi ce nu reclamă o îndemânare considerabilă. De fapt, s-ar putea să fie doar o chestie de noroc, şi doar să arate ca şi cum ar cere o pricepere deosebită.

Amplitudinile de probabilitate sunt foarte ciudate, şi primul lucru care îţi vine în minte este că ideile noi şi stranii sunt în mod evident îndoielnice. Şi totuşi, aşa ciudate cum sunt, tot ceea ce poate fi dedus pornind de la ideea existenţei în cadrul mecanicii cuantice a unor amplitudini de probabilitate, funcţionează sută la sută, inclusiv pentru lunga listă de particule stranii. Ca atare, eu nu cred că vom conchide, atunci când vom descoperi măruntaiele din compoziţia lumii, că aceste idei sunt greşite. Cred că partea aceasta este corectă; dar prin asta, nu fac decât să ghicesc, să vă prezint modul în care ghicesc eu.

Pe de altă parte, cred că teoria potrivit căreia spaţiul este continuu este greşită, pentru că obţinem aceşti infiniţi şi alte dificultăţi, şi pentru că rămânem cu întrebări referitoare la ce anume determină mărimea tuturor particulelor. Suspectez mai degrabă că ideile simple ale geometriei, atunci când sunt extinse la spaţii infinit de mici, sunt eronate. Aici, desigur, nu fac decât să las un loc liber, fără a vă spune ce este de substituit. Dacă aş face-o, aş încheia această prelegere cu o lege nouă.

Unii s-au folosit de inconsistenţa totalităţii principiilor pentru a afirma că există doar o singură lume consistentă posibilă şi că, în cazul în care vom pune laolaltă toate principiile şi vom calcula foarte exact, nu numai că vom fi în măsură să deducem care din ele sunt cele viabile, dar vom descoperi şi că acelea sunt singurele principii posibile, dacă este ca întreaga chestiune să rămână în continuare consistentă. Mie aceasta îmi sună a ordine la scară mare. Eu cred că trebuie pornit de la considerentul că există anumite lucruri – nu toate cele 50 de particule ciudate, ci câteva lucruri mici, precum electronii etc. – şi că apoi, pe baza tuturor principiilor, marile complexităţi care se nasc reprezintă probabil o consecinţă bine determinată. Nu cred că se poate obţine întregul ansamblu numai din argumente privind consistenţa.

O altă problemă pe care o avem o constituie interpretarea simetriilor parţiale. Aceste simetrii, cum ar fi enunţul că neutronii şi protonii sunt aproape la fel, dar nu şi din perspectiva electricităţii, sau faptul că legea simetriei la reflexie este exactă cu excepţia unui singur gen de reacţie, sunt foarte supărătoare. Ceva este aproape simetric, dar nu perfect. Actualmente există două şcoli de gândire. Una afirmă că explicaţia este foarte simplă, că lucrul acela chiar este simetric, dar că apare o uşoară complicaţie care strică puţin socotelile. Cealaltă, care are un singur reprezentant, pe mine, spune că, dimpotrivă, chestiile ar putea fi complicate, şi să devină simple doar prin intervenţia complexităţii. Grecii credeau că orbitele planetelor sunt cercuri. De fapt, ele sunt elipse. Nu sunt chiar simetrice, dar sunt foarte aproape de a fi cercuri.

Întrebarea este: de ce sunt ele foarte aproape de a fi cercuri? De ce oare sunt aproape simetrice? Din cauza unui îndelungat şi complicat efect de fricţiuni reciproce – o noţiune foarte complexă. Este posibil ca natura, în sinea ei, să fie absolut asimetrică în aceste privinţe, dar să ajungă să arate aproximativ simetric din cauza complexităţii realităţii, şi astfel elipsele să arate aproape ca nişte cercuri. Este şi asta o posibilitate; dar nimeni nu ştie: totul este simplă speculaţie şi ghiceală.

Să presupunem că aveţi două teorii, A şi B, care din punct de vedere psihologic arată complet diferit, cu concepte diferite şi aşa mai departe, dar că toate consecinţele calculate din ele sunt exact la fel, şi că ambele concordă cu experimentul. Deşi iniţial sună diferit, cele două teorii au toate consecinţele identice, lucru de obicei uşor de demonstrat din punct de vedere matematic, dacă se arată că logicile din cadrul lui A şi B dau mereu rezultate analoage. Să presupunem că aveţi două astfel de teorii; cum veţi decide care este corectă? La nivel de ştiinţă, nu se poate, pentru că ambele concordă cu experimentul în aceeaşi măsură. Deci două teorii, deşi se pot sprijini pe noţiuni complet diferite, pot fi identice din punct de vedere matematic, şi nu există nici o cale ştiinţifică de a le deosebi.

Totuşi, din motive psihologice, pentru a ghici noi teorii, cele două ar putea fi foarte departe de a fi echivalente, ele născând în om idei diferite. Aşezând teoria într-un cadru de un anumit gen, îţi poţi face o idee despre ce să schimbi. De exemplu, în teoria A va exista ceva care va vorbi despre un anumit lucru, şi vei putea spune: „Aici voi schimba această idee.“ Însă ar putea fi foarte complicat de aflat care ar fi lucrul analog ce ar urma să fie schimbat în teoria B – ar putea să nu fie deloc o simplă idee. Cu alte cuvinte, chiar dacă ele, înainte de a fi modificate, sunt identice, ar putea exista anumite căi de a o schimba pe una din ele de o manieră firească, şi care să nu pară naturale pentru cealaltă. Ca atare, din punct de vedere psihologic, trebuie să avem în minte toate teoriile, şi orice fizician teoretician care este cât de cât priceput, cunoaşte şase sau şapte reprezentări teoretice diferite pentru exact aceeaşi fizică. El ştie că sunt echivalente toate, şi că nimeni nu va fi nicicând în stare să decidă care este corectă la acel nivel, dar le are în minte sperând că ele îi vor oferi diferite idei de a ghici.

Aceasta îmi aminteşte de un alt aspect, acela că filosofia sau ideile din jurul unei teorii se pot schimba enorm de mult atunci când ei i se aduc modificări foarte mici. De exemplu, ideile lui Newton despre spaţiu şi timp

erau în foarte bună concordanţă cu experimentul, dar, pentru a se obţine mişcarea corectă pe orbită a lui Mercur, care diferea foarte foarte puţin, a fost nevoie de o diferenţă enormă a caracterului teoriei. Motivul a fost acela că legile lui Newton erau atât de simple şi de perfecte, şi că produceau rezultate bine precizate. Pentru a obţine ceva care să producă un rezultat puţin diferit, trebuia să fie un lucru complet diferit. Atunci când enunţi o lege nouă, nu poţi să aduci imperfecţiuni unei chestii perfecte; trebuie să faci o altă chestie perfectă. Deci, ca idei filosofice, diferenţa dintre teoriile despre gravitaţie ale lui Newton şi Einstein este enormă.

Ce reprezintă aceste filosofii? Ele constituie propriu-zis nişte maniere speculative de a calcula rapid consecinţe. O filosofie, care uneori este numită o înţelegere a legii, reprezintă pur şi simplu un mod în care cineva are legile în minte pentru a ghici rapid consecinţe. Unii au afirmat, iar în cazul ecuaţiilor lui Maxwell este adevărat, că „nu contează filosofia, nu contează nimic de genul acesta, ci contează numai să ghiceşti ecuaţiile; problema este doar să calculezi răspunsurile astfel încât ele să concorde cu experimentul, şi nu este necesar să ai o filosofie, sau o argumentaţie, sau cuvinte pentru acea ecuaţie". Acest lucru este bun în sensul că, dacă doar ghiceşti ecuaţia, nu faci apel la prejudecăţi, şi ghiceşti mai bine. Pe de altă parte, poate că filosofia te ajută să ghiceşti. Este foarte greu de spus.

Pentru aceia care insistă asupra faptului că singurul lucru important este ca teoria să concorde cu experimentul, aş dori să imaginez o discuţie între un astronom maya şi discipolul său. Mayaşii erau în stare să calculeze cu mare exactitate diferite predicţii, cum ar fi eclipsele, poziţia Lunii pe cer, a lui Venus, etc. Totul era făcut pe cale aritmetică: calculau un anumit număr, scădeau altele, şi aşa mai departe. Nu se spunea ce este Luna. Nu se discuta nici măcar ideea că ea se rotşte. Pur şi simplu calculau timpul la care va fi fost lună plină, sau o eclipsă, sau mai ştiu eu ce. Să presupunem că un tânăr se duce şi îi spune astronomului: „Am o idee. Poate că lucrurile acelea se rotesc şi sunt ca nişte mingi de piatră, şi am putea calcula cum se mişcă ele într-o manieră total diferită de calcularea pur şi simplu a timpului la care ele apar pe cer." „Da," replică astronomul, „şi cât de exact poţi prevedea eclipsele?" „Încă nu mi-am dezvoltat prea mult teoria", răspunde el. Atunci astronomul îi zice: „Ei bine, noi putem calcula eclipsele mai precis decât poţi tu cu modelul tău, aşa că nu trebuie să te preocupi de această idee, pentru că, în mod evident, schema matematică funcţionează mai bine." Există o foarte puternică tendinţă ca atunci când cineva vine cu o idee şi spune „Haideţi să presupunem că lumea este aşa şi pe dincolo", ceilalţi să îi răspundă: „Şi ce

rezultat obții la cutare și cutare problemă?“ Iar el replică: „Încă nu mi-am dezvoltat suficient teoria.“ Atunci ei îi zic: „Ei bine, noi ne-am dezvoltat-o deja pe a noastră mult mai mult și putem obține răspunsurile cu foarte mare exactitate.“ Deci, este o problemă dacă să ne preocupăm sau nu de filosofiile din spatele ideilor.

Un alt mod de abordare, desigur, este cel de a ghici noi principii. În cadrul teoriei sale asupra gravitației, Einstein a ghicit, mai presus de toate celelalte principii, pe acela care corespunde ideii că forțele sunt totdeauna proporționale cu masele. El a ghicit că dacă te afli într-o mașină care accelerează, nu poți deosebi acest fenomen de cel de a te afla într-un câmp gravitațional. Adăugând acest principiu tuturor celorlalte, el a fost în măsură să deducă legile corecte ale gravitației. Acest lucru subliniază o serie de posibile căi de a ghici.

Aș dori acum să mă refer la alte câteva aspecte legate de rezultatul final. În primul rând, atunci când am terminat, și avem o teorie matematică prin intermediul căreia să putem calcula niște consecințe, ce avem de făcut? Un fapt realmente uimitor. Pentru a determina de exemplu ce urmează să facă un atom într-o situație dată, noi concepem niște instrucțiuni reprezentate prin simboluri scrise pe o hârtie, le transferăm unei mașinării care are întrerupătoare ce se închid și se deschid într-o manieră complicată, iar rezultatul ne spune nouă ce va face atomul! Dacă felul în care aceste întrerupătoare se închid și se deschid ar reprezenta un soi de model al atomului, atunci aș putea afirma că înțeleg, mai mult sau mai puțin, ce se întâmplă efectiv cu el. Găsesc că este un lucru cât se poate de uimitor faptul că, prin intermediul matematicii, care înseamnă pur și simplu respectarea unor reguli ce nu au propriu-zis nimic de-a face cu ceea ce se petrece în cadrul chestiunii originare, se poate totuși prezice ce urmează să se întâmple. Închiderea și deschiderea unor întrerupătoare într-un calculator sunt lucruri cât se poate de diferite de ceea ce practic are loc în natură.

Unul din lucrurile cele mai importante din toată afacerea asta cu „ghicește - calculează consecințe - compară cu experimentul“, este să știi când ai dreptate. Este posibil să știi că ai dreptate cu mult înainte de a verifica toate consecințele. Poți recunoaște adevărul prin frumusețea și simplitatea lui. Este totdeauna ușor, atunci când ai ghicit ceva și ai efectuat două-trei mici calcule, să te asiguri că în mod evident nu ai greșit, să știi că ai dreptate. Atunci când ai nimerit-o, este evident că ai nimerit-o – cel puțin, dacă ai ceva

experienţă – căci ceea ce se petrece de obicei este că reies mult mai multe lucruri decât cele de la care s-a pornit. În fapt, ipoteza ta este că ceva este foarte simplu. Dacă nu poţi sesiza imediat că ai greşit, şi ţi-a ieşit mai simplu decât era înainte, atunci ai dreptate. Cei lipsiţi de experienţă, cei bătuţi în cap, ceilalţi de felul acesta, ghicesc lucruri simple, dar pe care tu le vezi imediat că sunt eronate, aşa că acestea nu intră în discuţie. Alţii, studenţii lipsiţi de experienţă, ghicesc lucruri foarte complicate, care la prima vedere arată în regulă, dar tu ştii că nu sunt adevărate, pentru că întotdeauna se dovedeşte că adevărul este mai simplu decât îţi închipui. Ceea ce ne trebuie este imaginaţie, dar o imaginaţie într-o teribilă cămaşă de forţă. Trebuie să găsim o nouă perspectivă asupra lumii, care să concorde cu tot ceea ce este cunoscut, dar care undeva în predicţiile ei să dea altceva, căci altfel ea este neinteresantă. Iar în privinţa acestui altceva, ea trebuie să fie în concordanţă cu natura. Dacă poţi găsi orice altă viziune asupra lumii, care să concorde cu întregul domeniu de lucruri ce au fost deja observate, dar care să difere altundeva, înseamnă că ai făcut o mare descoperire. Este aproape, dar nu cu totul imposibil, să găseşti o teorie care să concorde cu experimentul pe întregul domeniu în care au fost verificate toate teoriile, şi care să ofere totuşi consecinţe diferite în vreun alt domeniu, chiar dacă se va fi dovedind că acestea nu concordă cu natura. Este extrem de greu să-ţi vină o idee nouă. Este nevoie de o imaginaţie fantastică.

Ce se poate spune despre viitorul acestei aventuri? Ce se va întâmpla în ultimă instanţă? Continuăm să ghicim legi; câte legi vom mai avea de ghicit? Nu ştiu. Unii dintre colegii mei susţin că acest aspect fundamental al ştiinţei noastre va continua; însă eu cred că mai mult ca sigur nu o vom ţine într-o perpetuă noutate decât, să zicem, o mie de ani. Chestia aceasta nu poate continua la nesfârşit, astfel încât să descoperim mereu tot mai multe legi noi. Dacă ar fi aşa, faptul că ar exista atât de multe niveluri unul sub altul ar deveni plictisitor. Părerea mea este că ceea ce se poate petrece în viitor este fie ca toate legile să devină cunoscute – adică, dispunând de suficiente legi, să se poată calcula consecinţe care să concorde totdeauna cu experimentul, ceea ce ar însemna capătul liniei – fie ca experimentele să devină din ce în ce mai greu de realizat, din ce în ce mai scumpe, astfel încât să obţinem 99,99% din fenomene, dar să mai existe totdeauna vreun fenomen, foarte greu de măsurat şi în dezacord cu restul, care să fie descoperit tocmai atunci. Şi de îndată ce va fi existând o explicaţie pentru acesta, să apară un altul, mereu mai rare şi mai neinteresante. Acesta este un alt mod de a se sfârşi. Însă eu cred că, într-un fel sau altul, trebuie să se termine.

Suntem foarte norocoşi să trăim într-o epocă în care încă se mai fac descoperiri. Este precum descoperirea Americii – nu o poți face decât o singură dată. Epoca în care trăim este cea în care descoperim legile fundamentale ale naturii, şi ea nu va mai reveni vreodată. Este foarte palpitant, este minunat, dar această fervoare va trebui să se încheie. Desigur, în viitor vor exista alte interese. Va exista interesul de a lega un nivel al fenomenelor de altul, cum ar fi cel al fenomenelor din biologie, sau, dacă ne referim la explorări, cel al explorării altor planete. Însă oricum, nu va mai fi acelaşi lucru ca cel pe care îl întreprindem noi acum.

Un alt fapt care se va întâmpla va fi că, în ultimă instanță, dacă se va dovedi că totul este ştiut, sau dacă va deveni foarte plictisitor, filosofia vigu-
roasă şi atenția amănunțită acordate tuturor acestor lucruri despre care v-am vorbit, vor dispărea treptat. Filosofii care fac tot timpul remarci stupide nu vor mai putea fi ținuți la distanță spunându-li-se „dacă ați avea dreptate, am fi în stare să ghicim toate celelalte legi", căci atunci când vom dispune de ele, ei vor tăbărî cu explicațiile. De pildă, există mereu explicații privind motivul pentru care lumea este tridimensională. Ei bine, nu există decât o singură lume, şi este greu de spus dacă explicațiile respective sunt sau nu corecte. La fel, dacă totul va fi cunoscut, va exista o explicație oarecare a motivului pentru care acelea ar fi legile corecte. Însă acea explicație s-ar situa într-un cadru în care noi nu am putea argumenta criticând că respectivul tip de raționament nu ne permite să mergem mai departe. Ar avea loc o degenerare de idei exact la fel ca degenerarea pe care o resimt marii exploratori că se petrece atunci când turiştii încep să invadeza un teritoriu.

În această epocă oamenii trăiesc experiența unei încântări: imensa încântare pe care o resimți atunci când ghiceşti cum va funcționa natura într-o nouă situație, nemaiîntâlnită până atunci. Din experimentele şi informațiile corespunzătoare unui anumit domeniu, poți ghici ce urmează să se întâmple într-o regiune neexplorată de nimeni până acum. Este puțin diferit de explorarea obişnuită, în sensul că pe teritoriul deja descoperit există suficient de multe indicii pentru a ghici cum urmează să arate pământul nedescoperit încă. Întâmplător, aceste ipoteze sunt adesea foarte diferite de ceea ce ai văzut deja – ele înglobează o cantitate mare de gândire.

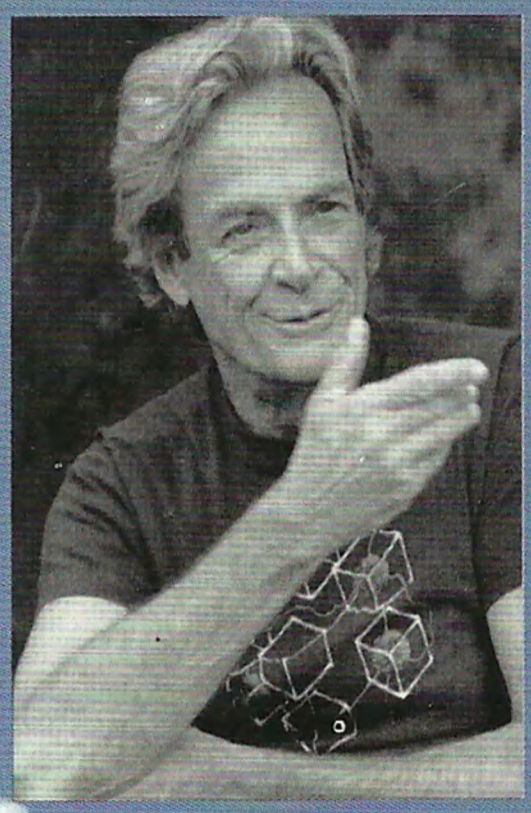
Care-i treaba cu natura, că permite aşa ceva, că este posibil să ghiceşti, pe baza unei porțiuni, ce urmează să facă restul ei? Aceasta este o întrebare neştiințifică: nu ştiu ce să răspund, aşa încât voi da un răspuns neştiințific. Cred că este din cauza faptului că natura posedă o simplitate şi, în consecință, o mare frumusețe.

În curând, la Editura Pergament, în cadrul colecției

fun,da'mental

Cu toţii cunoaştem faptul că, prin însăşi natura ei, lumina este incompatibilă cu ideea de repaus, de viteză egală cu zero. În plus, mulţi ştiu că în vid lumina se propagă cu viteza de aproape 300.000 km/s. Deci, lumina nu are viteză nulă.

Da... dar nu are nici 300.000 km/s! *Lumina nu prezintă ceva care să se numească viteză*! Idee aberantă? Veţi putea decide singuri acest lucru, citind următorul volum.



Richard P. Feynman face parte din acei foarte puțini fizicieni care, în ultimele trei-patru decenii, și-au câștigat un loc binemeritat alături de marii clasici. Însă, mai mult decât atât, profesorul Feynman este cel care a știut ca nimeni altul să explice pe înțelesul tuturor cele mai abstracte și mai subtile aspecte ale fizicii.

Să pătrundem în aula prestigioasei universități americane Cornell, pentru a urmări „pe viu" o serie de prelegeri nu *de*, ci *despre* fizică. Transcrierea lor reproduce cu fidelitate înregistrarea realizată cu această ocazie de televiziunea BBC, fără alte retușuri ulterioare, tocmai din dorința de a păstra pe cât posibil nealterată savoarea spectacolului de la catedră.

Cuceririle științei ne suscită interesul și ne stârnesc admirația. Dar, de multe ori, în calea înțelegerii unei teorii se interpune necesitatea unei pregătiri de specialitate. Acest lucru îi face pe mulți dintre noi să renunțe la curiozitatea ce îi animă.

Poate fi explicată știința pe înțelesul tuturor? Răspunsul este afirmativ, dar cu condiția ca expunerile să fie susținute de cele mai mari somități în materie, singurele persoane capabile să explice lucrurile într-un stil

fun,da'mental

ISBN (10) 973-85481-1-X Lei: 20 RON
ISBN (13) 978-973-85481-1-4 200.000 ROL

9 789738 548114